

Aus der Klinik und Poliklinik für Zahn-Mund-Kieferkrankheiten
der Universität Marburg
Geschäftsführender Direktor: Prof. Dr. Dr. H.-J. Hering

**Die Maximalfestigkeit
von warmpolymerisierten Prüfkörpern
aus dem Dental-Kunststoff „Paladon 65“
in Abhängigkeit
von längerdauernden Vorbelastungen**

INAUGURAL-DISSERTATION
zur Erlangung des Doktorgrades
der Zahnheilkunde

dem Fachbereich Humanmedizin der
Philipps-Universität zu Marburg

vorgelegt von

Jürgen Pauly
aus Gießen/Lahn

Marburg 1974

Digitized by the Internet Archive
in 2026

Aus der Klinik und Poliklinik für Zahn-Mund-Kieferkrankheiten
der Universität Marburg
Geschäftsführender Direktor: Prof. Dr. Dr. H.-J. Hering

**Die Maximalfestigkeit
von warmpolymerisierten Prüfkörpern
aus dem Dental-Kunststoff „Paladon 65“
in Abhängigkeit
von längerdauernden Vorbelastungen**

INAUGURAL-DISSERTATION
zur Erlangung des Doktorgrades
der Zahnheilkunde

dem Fachbereich Humanmedizin der
Philipps-Universität zu Marburg

vorgelegt von

Jürgen Pauly
aus Gießen/Lahn

Marburg 1974



Angenommen vom Fachbereich Humanmedizin
der Philipps-Universität Marburg

am 5. Juli 1974

Gedruckt mit Genehmigung der Fakultät

Dekan: Professor Dr. Oepen

Referent: Professor Dr. Janke

Correferent: Professor Dr. Müller

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
A. EINLEITUNG	1
B. HAUPTTEIL	4
I. Die Festigkeit des Kunststoffes	4
1. Der chemische Aufbau der Methakrylate	4
2. Das Bruchgeschehen in Abhängigkeit vom Molekulargefüge	4
3. Der Einfluß äußerer und innerer Faktoren auf die Festigkeit des Kunststoffes	5
4. Der Einfluß der Vorgeschichte auf den Kunststoff in Abhängigkeit vom thermodynamischen Gleichgewicht	7
5. Bruchfestigkeit und Brucharten von Hochpolymeren	9
6. Elastizitätsverhalten der Kunststoffe	10
7. Prüfung von Kunststoffen	11
II. Eigene Versuche	13
1. Herstellung der Prüfkörper	13
2. Anmischen des Prothesenkunststoffes "Paladon 65"	15
3. Polymerisation und Ausarbeitung der Normstäbe	16
4. Das Zeitstandprüfgerät	18
5. Die Ermittlung der Größe der Vorbelastung anhand der Zeitstandfestigkeitslinie	22
6. Die Herstellung der vorbelasteten Kunststoffproben	23
7. Die Universal-Prüfmaschine nach ROELL + KORTHAUS	24
8. Die Ermittlung der Zuggeschwindigkeit	26

	Seite
III. Ergebnisse der Versuche	26
IV. Diskussion der Versuchsergebnisse	30
1. Kurzzeitfestigkeit	30
2. Schwankungsbreite	33
3. Dehnung der Prüfkörper	34
4. Quasi-Kristallite	35
C. ZUSAMMENFASSUNG	36
D. LITERATURANGABEN	
E. ANHANG (Tabellen und graph. Darstellungen)	

A. E I N L E I T U N G

Das große Angebot zahnärztlicher Werkstoffe und deren Verarbeitungsmethoden machen es dem praktizierenden Zahnarzt kaum mehr möglich, Verhalten und Wirkungsweise des von ihm geplanten Zahnersatzes in Abhängigkeit von den Materialeigenschaften richtig einzuschätzen.

Forderungen an den Werkstoff, wie biologische Verträglichkeit in der Mundhöhle sowie durch die Funktion an ihn gestellten mechanischen Dauerbelastungen sollen erfüllt sein. Hinzu kommen kosmetische und wirtschaftliche Gesichtspunkte (JANKE, MARX).

Die Verantwortung gegenüber dem Patienten und die an den Zahnersatz zu stellenden klinischen Anforderungen zwingen den Zahnarzt sich mit der werkstofflichen Problematik auseinanderzusetzen. So ist es unerlässlich, durch laufende Untersuchungen z. B. in werkstoffkundlichen Laboratorien der Universitätskliniken die Eigenschaften angebotener Werkstoffe unabhängig von der Industrie dem Praktiker darzulegen. Es können unbrauchbare Werkstoffe frühzeitig erkannt und aussortiert werden, der Industrie werden Hinweise zur Verbesserung des Materials geliefert und dem Praktiker Mißerfolge erspart.

Vor Einführung der Kunststoffe (Paladon 1936) wurde als nichtmetallischer Werkstoff für die Plattenprothese nur der Kautschuk verwendet. Wie Untersuchungen (STRACK, DOLDER) ergaben - und auch die Praxis bewiesen hat - sind die mechanischen Eigenschaften der Kunststoffe denen des Kautschuks unterlegen.

STRACK ging in seiner Veröffentlichung "Für und Wider" so weit, daß er dem Kunststoff für die Zukunft nur die Rolle als Verkleidungsmaterial und nicht als Basisstoff zuerkennen wollte.

Durch die anfangs der "Methakrylära" (W. BAUER) erzielten Mißerfolge aufgrund unzureichender Kenntnisse über das Material sowie durch Übertreibungen und Überschätzen der Festigkeitswerte des Kunststoffes resultierten allmählich konkrete Vorschläge bezüglich der Verarbeitung und der Prüfmethodik des Materials.

Ziel war es, ein möglichst "langkettiges, homogenes und spannungsfreies Molekulargefüge des Kunststoffes" (TRINKAUS) zu erhalten. STRACK u. a. forderten angemessene Prüfmethoden, die den speziellen Werkstoffeigenschaften ("stoffliche Adaequanz") als auch den Bedingungen in der Mundhöhle ("klinische Adaequanz") angepaßt sind. Die Dauerbiegeprüfung sah STRACK als eine "klinisch adaequate Untersuchungsmethode für Kunststoffe" an.

Versuche, höhere Festigkeitswerte durch Verstärkungseinlagen in den Kunststoff wie Metallnetze, Perlon-einlagen u. ä. zu erzielen, erwiesen sich als wenig erfolgreich (STRACK, MATTHES, HENKEL).

JANKE entwickelte 1953 das Einpreß-Nachpreß-Gerät. In Verbindung mit dem LTP-Verfahren nach W. BAUER (Langzeit-Tieftemperatur-Polymerisation oder Wärmeschränkmethode) konnte mit diesem Verfahren ein günstigeres Festigkeitsverhalten des Kunststoffes gegenüber den bisherigen Verfahren erzielt werden. Zugleich wurde damit das Ausmaß der Polymerisationsschrumpfung herabgesetzt (FILLINGER, GERNAND, JANKE, MORITZ, STIEBELING, TRINKAUS).

Die Vielschichtigkeit der Problematik der Verarbeitung der Kunststoffe läßt sich aus der umfangreichen Literatur der letzten dreißig Jahre ersehen (SCHROEDER, MARX). Polymerisationsart, Abkühlungsmodus, Preßdruck, der Wassereinfluß während der Polymerisation und die Ausarbeitung des Werkstückes sind Faktoren, die die physikalisch-chemischen Werte der Prothese beeinflussen und daher einen Einfluß auf die Homo-

genität des Molekulargefüges haben und auf das Festigkeitsverhalten des Kunststoffes bestimmend einwirken.

JANKE verglich in Untersuchungen das Festigkeitsverhalten homogener und inhomogener Kunststoffproben. Er kam dabei zu dem Schluß, daß inhomogene Proben eine höhere Maximalfestigkeit besitzen als die homogenen, dagegen bei Langzeitprüfungen schlechtere Werte ergaben.

Aufgabe: Im Rahmen dieser Arbeit sollen artifizielle Strukturveränderungen an Kunststoffproben vorgenommen werden und diese dann auf ihr Festigkeitsverhalten hin untersucht werden.

B. H A U P T T E I L

I. Die Festigkeit des Kunststoffes

1. Der chemische Aufbau der Methakrylate:

Der Grundbaustein der Polymethylmethakrylate ist der farblose Methylester der Methakrylsäure.

Bei der Polymerisation des durch reaktionsfähige Doppelbindungen gekennzeichneten Monomers kommt es infolge Umlagerungen von Bindungen zu größeren Einheiten, zu kettenförmigen Makromolekülen (Polymer), welche durch Hauptvalenzen zusammengehalten werden. Die Zusammenlagerung einzelner Riesenmoleküle wird durch Nebenvalenzen bewirkt, die, in räumlicher Struktur angeordnet, in erster Linie die physikalisch-chemischen Eigenschaften des Kunststoffes bedingen.

2. Das Bruchgeschehen in Abhängigkeit vom Molekulargefüge:

Unter dem Einfluß von Wärme oder mechanischer Einwirkung kommt es zu einer Auflockerung des Molekulargefüges, somit zu einer Trennung der Nebenvalenzen (früher van-der-Waal'sche Kräfte) und zu einem Entschlingen bzw. Aneinandervorbeigleiten der Molekülketten ("Auseinanderzerren der Wattebauschstruktur", JANKE, HENKEL, DOLDER), was makroskopisch als Thermoplastizität bzw. als Fließen ("flow") in Erscheinung tritt. Bei genügender Intensität und Dauer des äußeren Einflusses kommt es schließlich zu einer Trennung der Strukturen, welche sich zunächst optisch, dann mechanisch in der mangelnden Festigkeit und der Ribildung und später als Bruch im Werkstoff zeigt.

Je länger eine Beanspruchung dauert, um so schwächer wird die Bindungskraft der Nebenvalenzen. Somit ist eine Zeitabhängigkeit der Festigkeit der Kunststoffe gegeben (JANKE).

3. Der Einfluß äußerer und innerer Faktoren auf die Festigkeit der Kunststoffe:

Die Festigkeit des Kunststoffes wird u. a. bestimmt durch die Größe der Molekülketten, deren räumliche Anordnung und der Molekulargewichtsverteilung und gegebenenfalls durch die Vernetzung, d. h. den Vernetzungsgrad. Je größer die Makromoleküle, um so größer sind im allgemeinen bei demselben Werkstoff die mechanischen Werte.

Durch Einwirken äußerer und innerer Einflüsse wird die Festigkeit des Kunststoffes maßgeblich beeinflusst (JANKE). Äußere Faktoren, wie Temperatur und Wassereinfluß bei der Polymerisation (Wasserbad- oder Trockenschrankmethode) sowie Dauer derselben beeinflussen die Kettenbildung und die Festigkeit der Polymeren. Je höher die Temperatur während der Polymerisation ist, um so kürzer sind die Molekülketten, d. h. umso niedriger ist das Molekulargewicht.

Bei der Polymerisation kommt es zur Ausbildung von verschiedensten Molekülgrößen, die vom reinen Monomer bis zu beträchtlichen, weit über dem mittleren Molekulargewicht liegenden Kettenlängen reichen können (DEWEIN, REHBERG). In von DEWEIN untersuchten Kunststoffproben, ausgehend vom mittleren Molekulargewicht, fand er ca. 1 % Restmonomer darin enthalten, welches die Ursache von Rißbildungen mit nachfolgender Bruchanfälligkeit darstellt. MARX bestätigte diese Untersuchungen.

Innere Faktoren, wie Einschlußfreiheit des Pulvers (Polymer) sind mitbestimmend für die Homogenität des Werkstoffes. Da bei der Verarbeitung von Pulver und Flüssigkeit das Pulver an der abspielenden chemischen Reaktion nicht teilnimmt, treten höchstens an den Oberflächenzonen intermolekulare Verflechtungen auf, deren Dichte und Gleichmäßigkeit allerdings von wesentlichem Einfluß auf den Gefügebau und auf die Widerstandsfähigkeit des Werkstückes gegen mechanische und chemische Einflüsse sind (WILD).

HAEPFELI hat erstmals darauf hingewiesen, daß bei mikroskopischer Betrachtung der Perlen diese voller Einschlüsse sind und ungleichmäßig verteilte Anhäufungen von Niedrigpolymeren aufweisen. Die Einschlüsse konnte er als Luftblasen, Wassertröpfchen und Primärperlen, die bei der Herstellung meist zusammen mit Luft von einer Polymerisationshaut umgeben wurden, identifizieren.

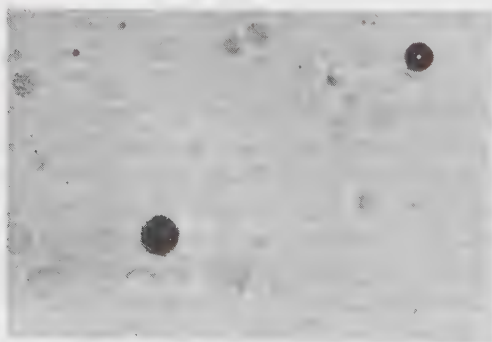


Abb. 1: "Paladon 65" rosa, 250-fache Vergrößerung

Diese Einschlüsse bzw. Inhomogenitäten sind von maßgebendem Einfluß auf die mechanische Festigkeit und die chemische Widerstandsfähigkeit. Änderungen des Molekulargefüges durch Lunker-, Blasen- und Porenbildung beeinflussen im Sinne von Inhomogenitäten ebenso die Eigenschaften von Kunststoffen (WILD, HAEFELI).

4. Der Einfluß der Vorgeschichte auf den Kunststoff in Abhängigkeit vom thermodynamischen Gleichgewicht: Schon bei der Herstellung und insbesondere im Laufe der Verarbeitung eines Kunststoffes wird dieser einer Behandlung unterworfen, welche in vielen Fällen nicht ohne Auswirkung bleibt. Dies kann zu Veränderungen seiner chemisch-physikalischen Eigenschaften führen. Hochpolymere sind im Vergleich zu niedermolekularen Materialien z. B. Metallen weniger gut definiert. Molekulargewicht und Molekulargewichtsverteilung sind von Probe zu Probe nicht einheitlich (F. H. MÜLLER, JANKE). Um eine Vergleichsmöglichkeit eines Materials zu erzielen, wird in der Technik ein Verfahren verwandt, das Tempern, um eine Bezugsmöglichkeit für jedes Material auf einen Standardzustand zu erhalten. EICHNER beschreibt einige Verfahren zur Vergütung von zahnärztlichen Kunststoffen verschiedener Autoren wie FREITAG, BAUER und HIPPE, die nach seinen Nachuntersuchungen nicht sehr erfolgversprechend waren. EICHNER hebt hervor, daß beim Tempern ein Kunststoff entsteht, der polymer nicht einheitlich ist und auch Spannungen aufweisen muß.

REHBERG und DEWEIN messen dem Residualmonomer in auspolymerisierten Prothesen so große Bedeutung bei, daß sie zur Eliminierung desselben durch Tempern "gewisse Zugeständnisse in Bezug auf Festigkeit,

Wasserbeständigkeit und sonstige Eigenschaften der Dentalkunststoffe" machen, um Schleimhautreizungen, Allergien und biologische Spätschäden zu vermeiden.

Nach DEWEIN kann durch Langzeitpolymerisation bei niedriger Temperatur und linearem Abkühlungsmodus das Restmonomer zum größten Teil zum Verschwinden gebracht werden, stellt jedoch noch keine optimale Polymerisation zur Vermeidung des Restmonomers dar.

Die Vorgeschichte eines Kunststoffes umfaßt dessen gesamte Behandlung bis zum Zeitpunkt der Untersuchung. Die Eigenschaften von Hochpolymeren sind bestimmt durch das Zusammenwirken vieler Moleküle. Infolge ihrer Raumerfüllung und ihrer Wechselwirkung (Abstoßungs- und Anziehungskräfte) stellt sich durch die thermische Bewegung mehr oder weniger rasch ein gewisser statischer Ordnungszustand wieder ein. Dieser ist jedoch abhängig von Temperatur und Druck. Durch Änderung des statischen Ordnungszustandes infolge äußerer Einflüsse ist das Molekulargefüge bestrebt nach gewisser Zeit den Gleichgewichtszustand wieder zu erreichen (Relaxationsverhalten, F.H. MÜLLER).

Bei Makromolekülen kann die thermische Bewegung infolge der Verfilzung der Moleküle so stark gehemmt sein, daß sich kein thermodynamisches Gleichgewicht mehr einstellen kann bzw. das Relaxationsverhalten ist zwar gegeben, aber die Einstellung des thermodynamischen Gleichgewichtes erfolgt erst nach extrem langer Zeit (F.H. MÜLLER, SCHWICKERATH, STRACK). Kunststoffe befinden sich also meist im thermodynamischen Ungleichgewicht. Dies ist die eigentliche Ursache der "Vorgeschichte".

Geringe thermische Einflüsse auf das Material können geringe Umordnungen im Molekulargefüge hervorrufen. Diese Umordnungen akkumulieren bis sie als deutliche Strukturveränderungen erscheinen (F. H. MÜLLER, SCHWICKERATH). Diese bewirkten thermodynamischen Ungleichgewichte zielen alle darauf hin das thermodynamische Gleichgewicht zu erreichen; es wird aber praktisch nie erreicht (F. H. MÜLLER).

5. Bruchfestigkeit und Brucharten von Hochpolymeren:

Die geringere Festigkeit unserer Kunststoffprothesen gegenüber den Kautschukprothesen war bereits zu Beginn der Methakrylära (BAUER, STRACK) ein viel-diskutiertes Problem. Die herausnehmbaren Kunststoffprothesen wiesen trotz sachgemäßer Behandlung durch den Träger nach einer gewissen Zeit (ca. 2 Jahren) Brüche auf.

Schon STRACK forderte Dauerbiegeprüfungen für Kunststoffe, da Kurzzeitfestigkeitsprüfungen keine endgültige Aussage hinsichtlich der Dauerbelastungen, die die Kunststoffprothese im Munde erfährt, geben können.

Die Festigkeit eines Stoffes ist gegeben durch den Widerstand, den er einer Kraft bis zum Bruch des-selben entgegensetzt. Diese Festigkeit ist abhängig von der Belastungsdauer, da nicht nur die Größe der Kraft, sondern auch die Beanspruchungsdauer den Brucheintritt bestimmt. Hieraus resultiert eine Zeit-abhängigkeit der Festigkeit. Je kleiner die einwirkende Kraft ist, desto länger ist die dazugehörige Bruchzeit, die Zeit zwischen Anbringen der Kraft und Eintritt des Bruches.

So kann ein Bruch spontan (Spontan- oder Gewaltbruch) oder erst nach längerer Zeit (Ermüdungsbruch) eintreten, je nach Größe der Kraft.

Nach der Richtung der einwirkenden Kraft unterscheiden wir die Zug-, Biege-, Scher-, Verdreh- und Druckfestigkeit eines Materials.

In einem Kraft-Zeit-Diagramm verdeutlicht, erhalten wir bei logarithmischer Zeit- und linearerKraftein- teilung eine nach rechts abfallende Gerade oder ein Band, die Zeitfestigkeitslinie eines Stoffes, aus der wir die Kurzzeitfestigkeit (eine große Kraft bewirkt nach kurzer Zeit den Bruch) als auch die Langzeitfestigkeit (eine kleine Kraft bewirkt nach längerer Zeit den Bruch) ablesen können.

Zur Aufstellung einer solchen Festigkeitslinie ist es erforderlich, 30 - 40 identische Prüfkörper unterschiedlichen Zugbelastungen zu unterwerfen.

Bei konstant gehaltener Kraft bei jeder einzelnen Probe erhalten wir analog zur Zeitfestigkeitslinie die Zeitstandfestigkeitslinie.

Der Bruch erfolgt bei einer abfallenden Last proportional dem Logarithmus der Belastungszeit. Daraus ergibt sich, daß bei Kunststoffen zu jeder Beanspruchungszeit eine bestimmte Festigkeit gehört (JANKE).

Aus dem Verlauf der Geraden lassen sich Rückschlüsse auf das mechanische Verhalten des Kunststoffes schließen.

6. Elastizitätsverhalten der Kunststoffe:

Zur Charakterisierung der Elastizität eines Stoffes gehört das Verhalten vor der Belastung und nach der Entlastung. Viele Stoffe z. B. Stahl sind in dem Gebiet, in dem das Hook'sche Gesetz gilt, voll elastisch, das heißt, sie nehmen nach der Entlastung den Ausgangszustand wieder ein. Die Hochpolymere gehen aber selbst nach kleinster Beanspruchung nicht mehr sofort in ihre Ausgangslage zurück (Relaxationsverhalten).

"Je länger nun der zeitliche Abstand zwischen den einzelnen Laststufen ist, um so mehr macht sich bei der Biegefestigkeitsprüfung die Vergrößerung der Durchbiegung bemerkbar, denn mit wachsendem Wert der Durchbiegung bei konstanter Last sinkt der Wert des E-Moduls. Aber nicht nur der zeitliche Abstand zwischen den einzelnen Laststufen wirkt auf die Änderung des E-Moduls ein, sondern auch die gesamte Zeit aller Belastungen" (SCHWICKERATH).

Insgesamt läßt sich feststellen, daß ein Sinken des E-Moduls von der Zeit der Belastungen abhängig ist (VOSS). Durch mechanische Einwirkung kommt es zu einer Störung des Molekulargefüges und somit zu einer Änderung des E-Moduls bzw. zum Sinken des Wertes des E-Moduls. Führt man Versuche mit steigender Belastung bis zum Bruche durch, so kann man feststellen, daß je mehr Zeit bis zum Bruch vergeht, um so geringer die Beanspruchung beim Bruch ist (Ermüdungserscheinung der Kunststoffe).

Die Änderung der Elastizität ist nicht nur von der einwirkenden Kraft abhängig, sondern auch von der Temperatur. Je höher die Temperatur, desto geringer die Elastizität, desto größer die Durchbiegung bzw. die Längenzunahme (SCHWICKERATH).

7. Prüfung von Kunststoffen:

Das Gebiet der Kunststoffprüfung hat in den letzten dreißig Jahren einen immer größeren Umfang angenommen. Zunächst lehnte man sich an die Methoden der von der Metallseite her bekannten Werkstoffprüfungen an. Doch die unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften, wie hohe Formänderungsfähigkeit und Elastizität erzwangen geeignete und für die Kunststoffe spezifische Prüfverfahren.

Die mechanisch-technologischen Prüfverfahren erstrecken sich auf die Bestimmung von Zug-, Biege- und Bruch-

festigkeit sowie Schlagzähigkeit, Spannungswert (E-Modul), Schlagbiegefestigkeit mit dem Dynstat-Gerät, die vorwiegend Kurzzeitfestigkeitsbestimmungen darstellen.

Kurzzeitfestigkeitsuntersuchungen erwiesen sich jedoch als nicht genügend aussagefähig, sodaß Dauerfestigkeitsversuche vorgezogen wurden, da sie "stofflich adaequat" (STRACK 1947) waren. Auch HENKEL bestätigt den großen Wert der Untersuchungen auf Dauerfestigkeit für die prothetische Praxis.

Einige Verfahren aus der Metallprüfung wie z. B. die Ritzmethode nach SHORE oder das Prüfverfahren nach BRINELL zur Bestimmung der Oberflächenhärte waren für Kunststoffe wenig geeignet, da durch die Elastizität (Rückfederung) höhere Werte zustande kamen, als sie der Oberflächenhärte des Materials entsprechen (HERRMANN).

An Prüfmaterial und Prüfmethode müssen bestimmte Anforderungen gestellt werden, um praxisnahe Vergleiche ziehen zu können. HERRMANN: "Je vielseitiger die Prüfmethoden sind, um so besser kann man die Eigenschaften der Prothesenkunststoffe beurteilen und sie für die entsprechende Indikation verwenden".

HERRMANN fordert, daß die Prüfkörper nach dem gleichen Verfahren wie unsere Kunststoffprothesen hergestellt werden.

Aus Untersuchungen von JANKE geht hervor, daß verschiedene Prüfmethoden infolge der Eigenart der Materie zu verschiedenen Ergebnissen führen und diese nur relativ gewertet werden können. Zur Vermeidung dieser Diskrepanzen empfiehlt SCHWICKERATH gleiche Verarbeitungsverfahren, gleiche Maße des

Prüfkörpers als auch einheitliche Prüfmethode zu wählen. JANKE schlägt vor, die leichtreproduzierbare Festigkeitsprüfung mit konstanter Zeit einzuführen, die die Aufstellung von Zeitfestigkeitslinien erlaubt.

II. Eigene Versuche

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Maximalfestigkeit von vorbelasteten (inhomogenen) Prüfkörpern im mundähnlichen Milieu.

1. Herstellung der Prüfkörper:

Form und Abmessungen der Prüfkörper richten sich nach DIN 53 504. Es wurde der kleinste Normstab S 3 ausgewählt, da dieser mit seiner Dicke (höchstens 3 mm) etwa der Stärke von Kunststoffprothesen entspricht. Entsprechend diesen Maßangaben wurden Metallstäbe hergestellt.

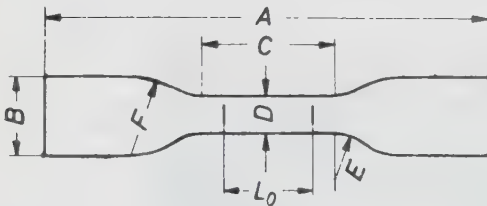


Abb. 2: (TRINKAUS)

A = Gesamtlänge	50 mm
B = Breite der Köpfe	8,5 mm
C = Länge des Steges	15 mm

D = Breite des Steges	4 mm
E = Übergangshalbmesser innen	10 mm
F = Übergangshalbmesser außen	0 mm
L ₀ = Messlänge	10 mm
Dicke des Prüfkörpers = höchstens	3 mm

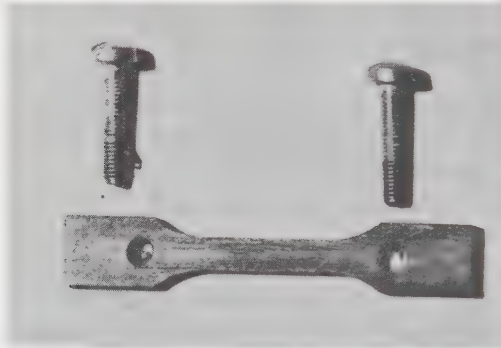


Abb. 3: (TRINKAUS)

Die Gewinde, die in die Metallstäbe eingedreht sind, wurden mit Wachs verschlossen und in eine Kuvette in Hartgips eingebettet. Nach Erhärten des Gipses wurde dieser mit einem Isoliermittel auf Alginatbasis bestrichen, der Konter der Kuvette aufgesetzt und mit einer Mischung von Alabaster- und Hartgips ausgegossen.



Abb. 4: (TRINKAUS)

Nach dem Abbinden des Gipses in der Küvette wurden Matrize und Patrize getrennt. Die mit Wachs verschlossenen Gewinde wurden mit heißem Wasser ausgebr ht, entsprechende Schrauben in die Gewinde eingedreht und durch vorsichtiges Drehen der Schrauben aus der Gipsform herausgehoben. Anschließend wurde die Form isoliert und nach Abtrocknen des Isolierfilmes mit Kunststoff beschickt.

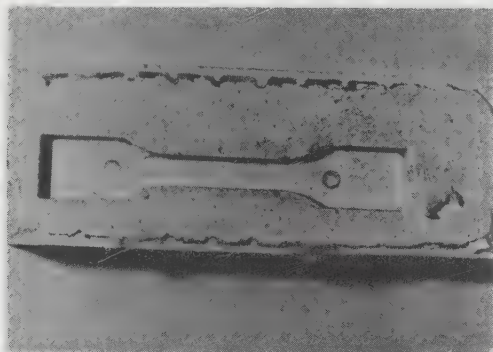


Abb. 5: (TRINKAUS)

2. Anmischen des Prothesenkunststoffes "Paladon 65":

Die Pr f rper wurden aus "Paladon 65" hergestellt, ein vernetztes Methakryls ureester-Copolymerisat auf Pulver- und Fl ssigkeitsbasis.

Das Anmischen des Kunststoffes erfolgte nach Angaben des Herstellers. Pulver und Flüssigkeit wurden im Verhältnis 3,5 Volumenteile Pulver zu 1 Volumenteil Flüssigkeit angemischt.

Nach gutem Durcharbeiten mit dem Porzellanspatel und einer 5 - 7 minütigen Anquellzeit wurde das Material in die Hohlform eingelegt und gepreßt.

Der Teig wurde mit Überschuß in die Küvette eingebracht und zur Vermeidung von Erhöhungen wurde mit einer Kunststoffolie (Kulzer) zwischengepre t.

Der Preßvorgang erfolgte langsam (ca. 10 Min.) und in Intervallen, sodaß dem überschüssigen Kunststoff die Möglichkeit blieb abzufließen.

3. Polymerisation und Ausarbeitung der Normstäbe:
Angewandt wurde die Langzeitpolymerisation im Wasserbad mit dem Gerät "Praxipol".

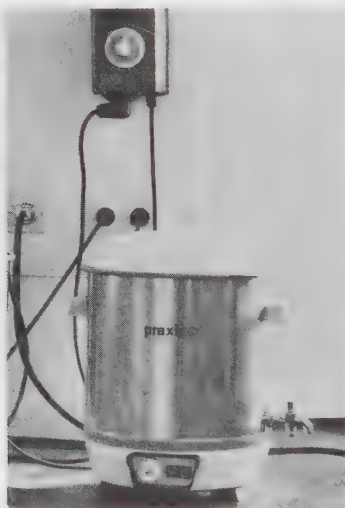


Abb. 6:

Danach wird der Wasserinhalt von ca. 12 Litern auf 70°C langsam aufgeheizt (1 1/2 Std.). Die erreichte Temperatur von 70°C wird für einen längeren Zeitraum (5 Std.) konstant gehalten. Erst dann erfolgt die Endpolymerisation durch Kochen (von 70°C auf 100°C 3/4 Std.). Nach Beendigung der Polymerisation schaltet das Gerät automatisch ab. Nach langsamen Abkühlen des Wasserbades wurden die Prüfkörper aus-
gebettet.

Die Preßfahnen wurden unter Vermeidung von Hitze-
bildung vorsichtig mit einer Kunststofffräse entfernt.

Anschließend wurden die Prüfkörper auf Naßschleifpapier unter stetigem Wasserzufluß auf eine Dicke von 2,5 mm heruntergeschliffen.

Die Prüfkörper wurden mit Bimsstein und zuletzt mit Schlämmkreide auf Politur bearbeitet, stets unter Vermeidung von Hitzebildung.

Nach der Politur der Prüfkörper wurden diese makroskopisch auf Kerben und Gipseinschlüsse sowie auf Blasen, Lunker und Poren untersucht. Die zur Untersuchung geeigneten Prüfkörper wurden in wässriger Lösung und vor dem Versuch mindestens 24 Stunden in RINGER-Lösung aufbewahrt.

Um einen optischen Eindruck über das Ausmaß der Vorgeschichte auf den Kunststoff bis zum eigentlichen Versuchsbeginn zu erhalten, wurden polierte Prüfkörper, die noch keiner Festigkeitsprüfung unterzogen wurden, im polarisierten Licht untersucht. Die mikroskopischen Aufnahmen zeigen, daß fast alle Prüfkörper mehr oder weniger innere Spannungen aufweisen (siehe Abb. 7). Wir sprechen dann von inneren Spannungen, wenn auf kleine äußere Belastungen hin ein Bruch eines Materials eintritt, ohne daß dieser Bruch hinreichend aus dem Verhältnis von Ausgangsfestigkeit und Krafteinwirkung begründet ist, oder wenn sich solche inneren Spannungen im polarisierten Licht direkt sichtbar machen lassen (STRACK).

RITZE wies nach, daß abwechselndes Quellen und Trocknen des Kunststoffes zu inneren Spannungen führt. Anhand eigener Untersuchungen stellte JANKE fest, daß eine kurzzeitige Polymerisation sowie zu schnelles Abkühlen nach der Polymerisation ebenfalls zu inneren Spannungen im Kunststoff führen können.

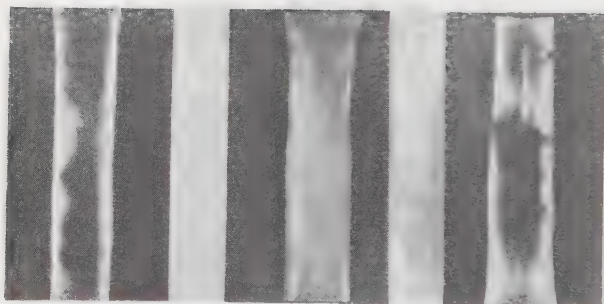


Abb. 7:

REHBERG erbrachte den optischen Nachweis, daß Kunststoffe nach dem Polymerisieren nicht völlig spannungsfrei sind. REHBERG unterscheidet innere und äußere Spannungen. Innere Spannungen entstehen durch die Verarbeitung des Materials, äußere dagegen werden durch die Bearbeitung der Oberfläche verursacht.

4. Das Zeitstandprüfgerät:

Das Zeitstandprüfgerät besteht aus einem Stahlgestell, in das ein Behälter aus nichtrostendem Stahl eingehängt ist. Eine Heizvorrichtung mit Thermostat und Kontaktthermometer sorgen für eine gleichbleibende Temperatur von 37°C ($\pm 2^{\circ}\text{C}$). Um eine gleichmäßige Temperatur innerhalb des Behälters zu gewährleisten sowie zur Vermeidung von Wärmeschwankungen ist dieser mit Styroporplatten isoliert.

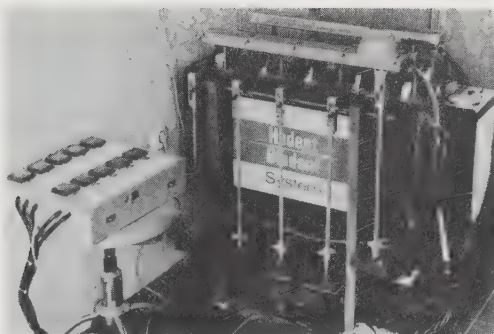


Abb. 8: (TRINKAUS)

Da die Untersuchungen im mundähnlichen Milieu stattfinden sollten, wurde der Behälter mit RINGER-Lösung aufgefüllt, die nach REIN/SCHNEIDER besteht aus: 0,8 % NaCl, 0,02 % KCl, 0,02 % CaCl_2 , 0,1 % NaHCO_3 , aqua dest. ad 100.

Die Verwendung der RINGER-Lösung als auch die in dem Behälter konstante Temperatur von 37°C erlauben die

Berücksichtigung des Weichmachereffektes, dem die Kunststoffprothesen im Mund ausgesetzt sind und der sich negativ auf die Festigkeit des Kunststoffes auswirkt.

Das Zeitstandprüfgerät ist mit zehn Prüfstellen ausgestattet, die es erlauben entsprechend viele Zeitstandversuche mit verschiedenen Belastungen gleichzeitig durchzuführen.

Die Übertragung der auf-

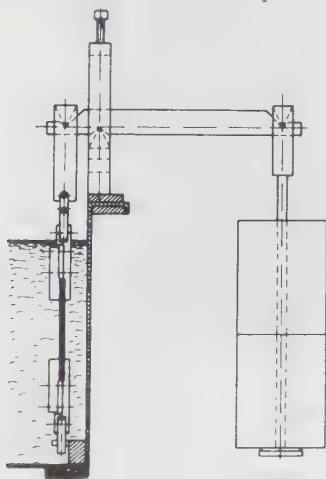


Abb. 9: (TRINKAUS)

gebrachten Last erfolgt über einen Hebel mit einer Übersetzung im Verhältnis 1:4.

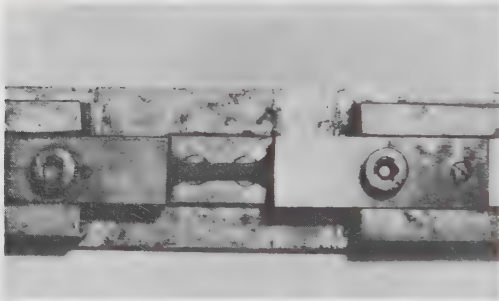
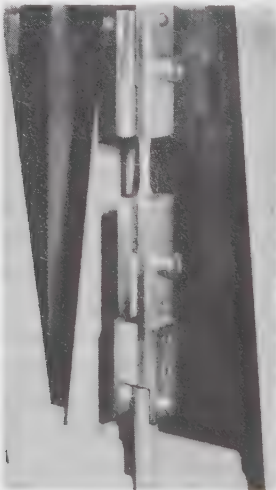


Abb. 10: (TRINKAUS)

Die Verwendung einer Einspannlehre aus rostfreiem Stahl gewährleistet gleichen Abstand zwischen den Einspannklemmen und verhindert gleichermaßen das Verkanten und exzentrische Einspannen der Prüfkörper.



Die Einspannklemmen sind dergestalt angeordnet, daß der Prüfkörper eingespannt sich etwa in der Mitte des Behälters befindet.

Mit Hilfe eines Exzenternocken kann die Last stoßfrei aufgebracht werden. Dies ermöglicht einen direkten Vergleich der Werte aus den Zugversuchen.

Abb. 11: (TRINKAUS)

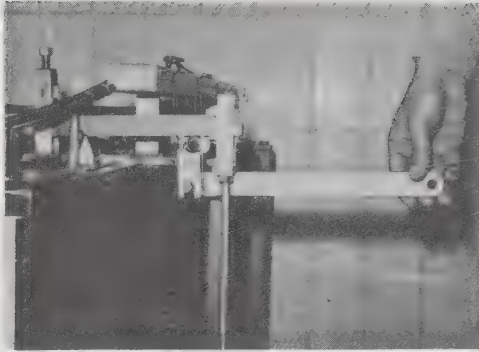


Abb. 12: (TRINKAUS)

Die obere Abbildung zeigt den Exzenternocken in situ, der Hebelarm ist entlastet. Die untere Abbildung zeigt das stoßfreie Anbringen der Last, der Hebelarm ist belastet.

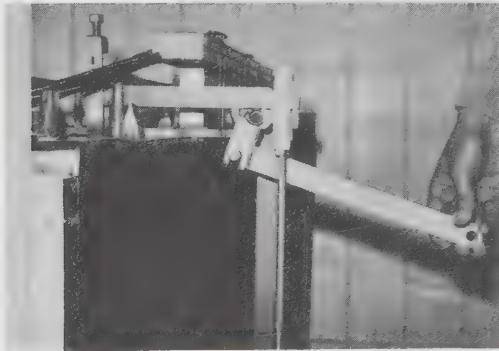


Abb. 13: (TRINKAUS)

Mittels einer mit dem Zeitstandprüfgerät gekoppelten Zeituhr (Synchronuhr) kann genau der Eintritt des Bruches des Prüfkörpers festgehalten werden. Der Meßbereich der Synchronuhr liegt bei 0,01 Stunden. Bei Brucheintritt fällt der lange Hebel über dem Zuggehänge herunter, eine Feder löst dabei einen Kontaktschalter aus und sperrt die weitere Stromzufuhr zu der Prüfstelle zugehörigen Zeituhr.

5. Die Ermittlung der Größe der Vorbelastung anhand der Zeitstandfestigkeitslinie:

Zur Ermittlung der Größe der Vorbelastung war die Bestimmung einer für den Kunststoff charakteristischen Kennlinie erforderlich.

Mit Hilfe der Zeitstandfestigkeitslinie soll die Größe der Vorlast für die folgenden Versuchsreihen ermittelt werden. Dazu wurden 30 - 40 Proben aus derselben Herstellung unterschiedlichen Zugbelastungen ausgesetzt, die Zeit bis zum Brucheintritt auf einer Zeituhr registriert und bei logarithmischer Zeiteinteilung und linearer Krafteinteilung in einem Diagramm aufgetragen.

Dabei wurde die einmal aufgebrachte Last bis zum Brucheintritt nicht mehr verändert, d.h. die Beanspruchung des Prüfkörpers war über den gesamten Zeitraum hinweg konstant. Je nach Größe der gewählten Last trat der Bruch früher oder später ein. Die einzeln aufgetragenen Punkte ergaben eine nach rechts abfallende Gerade bzw. ein Band, die Zeitstandfestigkeitslinie für den verwendeten Kunststoff "Paladon 65" (siehe Tabelle 1 und Diagr. 1). Aus dem Verlauf der Zeitstandfestigkeitslinie kann man ablesen, nach welcher Zeit der Prüfkörper unter einer bestimmten Belastung zu Bruch geht.

Um den aus der Zeitstandfestigkeitslinie gefundenen Wert auf Grund der Schwankungsbreite der Ergebnisse

richtig einzugrenzen, wurden in verschiedenen Versuchsreihen unbelastete Prüfkörper unterschiedlichen konstanten Belastungen ausgesetzt, die aber alle an den in dem Diagramm abgelesenen Wert der Belastung grenzten (siehe Tabelle 2,3,4 und 5). Aus der Summe der Einzelwerte wurde der arithmetische Mittelwert gebildet, der ungefähr den von der Zeitstandfestigkeitslinie abgelesenen Wert bestätigte.

Danach kommt es bei einer konstanten Belastung von 22 kp nach ca. 7 Stunden zum Bruch des Prüfkörpers.

6. Die Herstellung der "vorbelasteten" Kunststoffproben: Die Prüfkörper wurden in der zuvor beschriebenen Art polymerisiert und ausgearbeitet.

Da bei der Herstellung nicht alle Proben gleich dick waren, wurde jede Probe genau vermessen und alle Werte auf das Standardmaß von 2,5 mm x 4,0 mm Querschnitt bezogen und umgerechnet. Die Zugfestigkeit errechnet sich nach DIN 53 455 aus dem Quotienten der gemessenen Höchstkraft und dem Anfangsquerschnitt der Probe. Da die Zugfestigkeit in kp/cm^2 angegeben wird, mußten die erhaltenen Werte mit 10 multipliziert werden.

Für jede der folgenden Versuchsreihen wurden ca. 30 - 40 Proben hergestellt. Für alle Versuchsserien war die Größe der Belastung konstant 22 kp, die Belastungszeit wurde verändert.

Unter Berücksichtigung, daß die durchschnittliche Bruchzeit der Kunststoffproben bei einer konstanten Belastung von 22 kp ca. 7 Stunden beträgt, wurden Serien von Kunststoffproben jeweils 1 $\frac{3}{4}$ Std., 2 $\frac{1}{2}$ Std., 3 $\frac{1}{2}$ Std. und 5 $\frac{1}{4}$ Std. lang der o.g. Belastung ausgesetzt.

Über eine Zeituhr wurde die Belastungsdauer kontrolliert. Nach Ablauf der Belastungszeit wurden die Prüfkörper entlastet, vorsichtig aus dem Zeitstandprüfgerät herausgehoben und in der Einspannlehre den Einspannklemmen entnommen. Bis zur weiteren Verwendung wurden die Prüfkörper in RINGER-Lösung aufbewahrt.

Während der längerdauernden Vorbelastungen brachen einige Prüfkörper vorzeitig:

Belastungs- zeit (Std.)	Größe d. Last (kp)	<u>Anzahl der Prüfkörper</u>		Zahl d. vorzeitig zu Bruch geg. Pk. in %
		gesamt	vorzeitig zu Bruch gegangen.	
1 3/4	22	36	1	-
2 1/2	22	32	1	-
3 1/2	22	36	2	-
5 1/4	22	72	33	ca. 45

Je näher die Vorbelastungszeit an den Medianwert des Brucheintritts von 7 Std. bei konstanter Belastung von 22 kp kommt, desto größer wird die Zahl der vorzeitig zu Bruch gegangenen Prüfkörper.

7. Die Universal-Prüfmaschine nach ROELL + KORTHAUS:^{*)}
Die Prüfung der Maximalfestigkeit der vorbelasteten Kunststoffproben wurde an der Kraft-Dehnungs-Apparatur nach ROELL + KORTHAUS vorgenommen. Die Universal-Prüfmaschine vom Typ RK 1000 ist eine moderne Präzisions-Zug- und Druckprüfmaschine für kleine Belastungen in Einraumbauweise.

^{*)} Standort der Maschine: Insitut für Polymere in
Marburg/Lahn, Leit. Direktor: Prof. Dr. F.H. MÜLLER

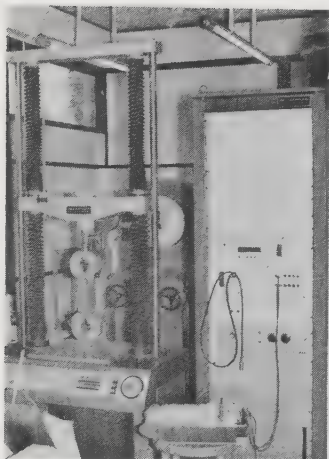


Abb. 14:

veränderliche Drehscheibe von Hand eingestellt werden.

Die von Hand eingestellte Zuggeschwindigkeit läßt sich mit Hilfe eines Kompensationsschreibers genau definieren. Die Kunststoffproben werden in eine an der Prüfmaschine angebrachten Probenhalterung eingespannt. Die untere Probenhalterung ist an der Prüfmaschine fest montiert, die obere dagegen an einer Traverse zwischen zwei Spindeln beweglich aufgehängt. Die Geschwindigkeit der Traverse ist über den Elektronikschrank regelbar.

Die Zugkraft wird über eine Kraftmeßdose an der oberen Probenhalterung vermittels Dehnungsmeßstreifen in eine Gleichspannung proportional umgeformt. Zur Registrierung der Größe der bei einem Zugversuch aufgewendeten Kraft wird die der Kraft proportionale Spannung mit einem Kompensationsschreiber aufgezeichnet.

An dem mit der Prüfmaschine gekoppelten Elektronikschrank lassen sich gemäß den Belastungsanforderungen an die Kunststoffprüfung verschiedene Meßbereiche einstellen (2, 5, 100, 1000 kp).

Eine an der Universal-Prüfmaschine angebrachte Tastatur ermöglicht die Einstellung von exakten elektronisch gesteuerten Zuggeschwindigkeiten. Zuggeschwindigkeiten, die nicht in der Maschine vorgeprogrammiert sind, können über eine kontinuierlich

8. Die Ermittlung der Zuggeschwindigkeit:

Für die Durchführung der Versuche wurde an der Universal-Prüfmaschine der kontinuierlich veränderliche Bereich für die Einstellung der Zuggeschwindigkeit benutzt. Zur exakten Ermittlung der Zuggeschwindigkeit wurde deshalb über eine Wegmessung, die mit verschiedenen konstanten und fest vorgegebenen Zuggeschwindigkeiten durchgeführt wurde, die benutzte Geschwindigkeit ermittelt, und zwar aus der Steigung ($\operatorname{tg} \alpha$) der bei der Wegmessung registrierten Weg-Zeit-Kurven.

Die zu den Zuggeschwindigkeiten zugehörigen ($\operatorname{tg} \alpha$)-Werte wurden in ein Diagramm gegen die entsprechende Geschwindigkeit eingetragen (Diagramm 6). Aus der so ermittelten Geraden ließ sich anhand des ($\operatorname{tg} \alpha$)-Wertes in dem Diagramm die bei den Zugversuchen zu verwendende Zuggeschwindigkeit ablesen.

III. Ergebnisse der Versuche

Vor Beginn der Prüfung der Normstäbe wurde die Universal-Prüfmaschine eingestellt und geeicht. Dazu wurde die Zuggeschwindigkeit in der beschriebenen Weise ermittelt und eingestellt. Bei der Aufstellung der Zeitstandfestigkeitslinie für "Paladon 65" (Diagramm 1) bestimmten wir eine Maximalfestigkeit von 390 kp/cm^2 . Bei einem Querschnitt der Prüflinge von ungefähr $1/10 \text{ cm}^2$ war eine maximale Zugkraft von 39 kp zu erwarten. Deshalb wurde für die Untersuchung der vorbelasteten Prüfkörper der Meßbereich von 100 kp ausgesucht.

Ein an die Universal-Prüfmaschine gekoppelter Kompensationsschreiber (KIPP + ZONEN) wurde zur Eichung der Prüfmaschine verwendet. Dazu wurde ein Gewicht von 5 kp in die Probenhalterung eingespannt und der Ausschlag des Kompensationsschreibers vermerkt.

Eingestellt wurde der Kompensationsschreiber auf 10 V für den Vollausschlag. Die Papiergeschwindigkeit betrug 500 mm/min..

Der Abstand beider Probenhalterungen wurde während der Durchführung der Kunststoffprüfungen fest eingestellt und vor jedem Einspannen eines Prüfkörpers mit der Schublehre kontrolliert. Damit wurde die Probenlänge über alle Versuche konstant gehalten, die bei der gewählten Zuggeschwindigkeit von 575 mm/min 24 mm betrug. Der Riß der Probe erfolgte im Mittel nach 0,4 Sekunden.

Beim Einspannen der Proben wurde darauf geachtet, daß die Längsachse der Prüfkörper in der Zugrichtung lag.

Es wurden 5 Versuchsreihen aufgestellt, von denen jede über 30 Proben aufwies.

Die erste Versuchsreihe war 1 3/4 Std. und die folgenden jeweils 2 1/2 Std., 3 1/2 Std. und 5 1/4 Std. mit dem konstanten Gewicht von 22 kp vorbelastet. Zum Vergleich wurde eine Serie unbelasteter Prüfkörper auf ihre Kurzzeitfestigkeit untersucht.

Die Kraft, die zum Bruch eines jeden Prüfkörpers erforderlich war, wurde über den Kompensationsschreiber aufgezeichnet.

Ein Einfluß der Probenhalterung auf das Reißverhalten der Prüfkörper war nicht nachweisbar. Die Rißstellen der Proben waren über der Strecke der Einspannklemmen statistisch verteilt (siehe Abb. 15).

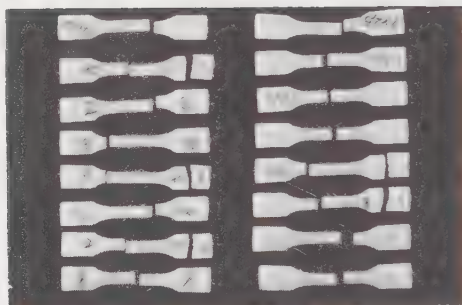


Abb. 15:

Zunächst wurde die Prüfung auf Maximalfestigkeit an den unbelasteten Proben vorgenommen. Hier zeigt sich, daß die Kurzzeitfestigkeitswerte sämtlicher Proben nahezu gleich waren (Tab. 6), und zwar stimmen die hier gefundenen Werte (Mittelwert $383,47 \text{ kp/cm}^2$) mit dem anhand der Zeitstandfestigkeitslinie gefundenen Maximalfestigkeitswert von 390 kp/cm^2 überein.

Bei der Prüfung der $1 \frac{3}{4}$ Std. lang vorbelasteten Kunststoffproben liegen die Festigkeitswerte deutlich über denen der unbelasteten Proben. Der mittlere Wert von $396,78 \text{ kp/cm}^2$ liegt sowohl über dem Medianwert der unbelasteten Proben aus der Kurzzeitfestigkeitsprüfung als auch über dem aus der Zeitstandprüfung abgeleiteten Wert (ca. 386 kp/cm^2).

Die Prüfkörper, die $2 \frac{1}{2}$ Std. lang vorbelastet wurden zeigen eine geringere Maximalfestigkeit als die unbelasteten Proben. Der arithmetische Mittelwert der Festigkeitswerte dieser Serie liegt mit $356,96 \text{ kp/cm}^2$ unter dem Niveau der unbelasteten Proben.

Noch schlechtere Kurzzeitfestigkeitswerte gegenüber denen der unbelasteten Prüfkörper sind bei den 3 1/2 Std. lang vorbelasteten Proben festzustellen. Der Mittelwert aus dieser Versuchsserie mit $344,4 \text{ kp/cm}^2$ ist um ca. 40 kp/cm^2 niedriger als der der unbelasteten Proben.

Dieser Trend zu ungünstigeren Maximalfestigkeitswerten ist auch an den Proben zu erkennen, die 5 1/4 Std. lang der Belastung von 22 kp ausgesetzt wurden. Hier beträgt der Medianwert $342,74 \text{ kp/cm}^2$.

Untersuchungen auf Quasi-Kristallite ⁺⁾

In der Kunststofftechnik wird ein Verfahren angewandt, bei dem Kunststoffasern verstreckt werden. Dabei kann es zu einer Parallelisierung und zu einem Aneinanderlegen der Makromoleküle und somit zur Ausbildung von sog. "Kristalliten" kommen, die für ein gesteigertes Festigkeitsverhalten verantwortlich gemacht werden.

Die Untersuchung der Proben auf kristalline Strukturen mit Hilfe der Differential-Thermo-Analyse (PERKIN-ELMER) erwies sich als negativ.

Ebenso konnten mit der Röntgen-Strukturanalyse Reflexe, die auf kristalline Strukturen schließen lassen, nicht festgestellt werden.

Es zeigte sich also damit, daß die in den vorhergehend beschriebenen Festigkeitsprüfungen erhaltenen höheren Festigkeitswerte nicht auf einer Umordnung des Gefüges im positiven Sinne zurückzuführen sind, sondern diese höchstwahrscheinlich als ein Ergebnis der Methodik selbst aufzufassen sind, da ja offensichtlich die Strukturen unter der Vorlast im negativen Sinne (eingeleiteter Verfall) beeinflußt wurden (Abb. 16:).

⁺⁾ Die Untersuchungen wurden im Institut für Polymere, Philipps-Universität Marburg a.d. Lahn
Direktor: Prof. Dr. F.H. MÜLLER, durchgeführt.

IV. Diskussion der Versuchsergebnisse

1. Kurzzeitfestigkeit:

Zur besseren Definition der Ergebnisse wurden diese auf Grund ihrer Maximalwerte in aufsteigender Reihe nach geordnet und für jede Versuchsreihe graphisch dargestellt (Diagramm 2). Von diesem Diagramm läßt sich ablesen, welchen Einfluß die Vorbelastung auf die Kurzzeitfestigkeit und auf die Struktur des Kunststoffes ausübt.

Ein Vergleich der Kurven zeigt, daß für die unbelasteten Proben verhältnismäßig konstante Kurzzeitfestigkeitswerte vorliegen (geringes Ansteigen der Kurve), dagegen finden wir bei den nur kurze Zeit ($1 \frac{3}{4}$ Std.) vorbelasteten Prüfkörpern zwar eine größere Schwankungsbreite (stärkeres Ansteigen der Kurve) der Werte aber zum überwiegenden Teil eine höhere Kurzzeitfestigkeit, die in einer Größenordnung bis zu 526 kp/cm^2 gemessen werden konnte. Die Kunststoffproben, die $2 \frac{1}{2}$ Std. vorbelastet wurden, wiesen insgesamt eine geringere Festigkeit gegenüber den unbelasteten Proben auf, jedoch konnten noch bei ca. 17 % der Proben bessere Kurzzeitfestigkeitswerte nachgewiesen werden.

Mit steigender Vorbelastungsdauer kommt es zu einem Abfall der Maximalfestigkeit.

So liegen die Kurven der Prüfkörper, die $3 \frac{1}{2}$ Std. vorbelastet wurden als auch derjenigen, die $5 \frac{1}{4}$ Std. der Vorbelastung unterzogen wurden, deutlich unter den Kurzzeitfestigkeitswerten gegenüber den unbelasteten Proben.

Eine ähnliche Aussage läßt sich machen, wenn man die arithmetischen Mittelwerte der Serien untereinander vergleicht (Diagramm 3). Es stellt sich heraus, daß

die Kunststoffproben, die einer geringen Vorbelastung (1 3/4 Std.) unterworfen wurden, die höchsten Kurzzeitfestigkeitswerte (396,78 kp/cm²) aufwiesen und somit noch bessere Werte zeigen als die unbelasteten Proben (383,47 kp/cm²). Je länger die Prüfkörper belastet werden, desto geringer wird ihre mittlere Kurzzeitfestigkeit.

Infolge der unterschiedlichen Belastungszeiten, denen die Prüfkörper ausgesetzt wurden, ergaben sich Serien von unterschiedlichen Inhomogenitätsgraden.

Überträgt man die Mittelwerte der maximalen Festigkeitswerte der verschiedenen Inhomogenitätsgrade auf ein Diagramm gegen die Zeit (Diagramm 4), so erhält man ein Bild, welches einem "gotischen Bogen" ähnelt (JANKE), aus dem das für einen bestimmten Inhomogenitätsgrad charakteristische Festigkeitsmaximum ersichtlich ist. Der Ausgangspunkt des "gotischen Bogens" stellt den Festigkeitswert des Kunststoffes in seinem homogensten Zustand dar. Infolge Induktion von schwachen Inhomogenitäten durch die Vorbelastung führt die Linie zu einem Festigkeitsmaximum des Werkstoffes, welches das "Inhomogenitätsoptimum" des Kunststoffes darstellt, d. h. bei diesem Inhomogenitätsgrad besitzt der Kunststoff sein absolutes Festigkeitsmaximum. Dagegen stellt der Festigkeitswert von 396,78 kp/cm² in der Kurve lediglich ein Festigkeitsmaximum für die Vorbelastungszeit von 1 3/4 Std. dar. Dieser Wert kann mit dem absoluten Festigkeitsmaximum für den Kunststoff "Paladon 65" übereinstimmen, jedoch ist es denkbar, daß das eigentliche Festigkeitsoptimum für diesen Kunststoff vor der Vorbelastungszeit von 1 3/4 Std. oder auch danach liegen kann.

Durch den Einfluß stärkerer Inhomogenitäten kommt es zu einem Abfall der Kurven, um mit zunehmender Belastungszeit fast senkrecht zur Zeit-Achse abzufallen.

Der abfallende Ast der Kurve durchläuft dabei einen Bereich, in dem die Festigkeitswerte der homogenen Proben liegen. So kann es sich bei Festigkeitsprüfungen ergeben, daß es zu einer scheinbaren Festigkeitsgleichheit zwischen den homogenen und den stärker inhomogenen Proben kommen kann.

Kurzzeitfestigkeitsprüfungen sind somit nicht ausreichend, um ein Material auf sein Festigkeitsverhalten hin befriedigend zu beurteilen. Zur Charakterisierung von Inhomogenitäten müssen daher zusätzliche Prüfmethoden herangezogen werden.

Die Schlußfolgerung, die aus den vorliegenden Ergebnissen gezogen werden, bestätigen die Untersuchungen JANKES.

An Prüfkörpern, die längerdauernden Vorbelastungen ausgesetzt wurden (3 1/2 Std. und 5 1/4 Std.) konnten im polarisierten Licht Rißbildungen nachgewiesen werden (siehe Abb. 16), was sich dann mechanisch in der mangelnden Festigkeit und auch durch einen frühzeitigen Brucheintritt bemerkbar macht.

Inhomogene Proben weisen im kurzzeitigen Bereich höhere Festigkeitswerte auf als homogene, zeigen dagegen im Langzeitbereich einen stärkeren Festigkeitsabfall als die homogenen Proben, so daß sich bei Aufstellung von Festigkeitslinien die Geraden im Kurzzeitgebiet kreuzen können.

Dies wird auch von TRINKAUS bestätigt, der Kunststoffproben verschiedener Inhomogenitätsgrade prüfte, die er durch Anwendung verschiedener Polymerisationsverfahren erhielt.

2. Schwankungsbreite:

Aus der mittleren Maximalfestigkeit einer Serie und der Summe der Differenzen der Festigkeitswerte der einzelnen Proben läßt sich die Schwankungsbreite für eine Versuchsserie errechnen.

Graphisch dargestellt ergibt sich eine ansteigende Kurve, wenn man auf der y-Achse die Schwankungsbreite (ΔS) in kp/cm^2 und auf der x-Achse die Zeit der Vorbelastung aufträgt (Diagramm 5). Aus dem Verlauf der Kurve ist zu erkennen, daß mit einem Ansteigen der Belastungszeit (t) die Schwankungsbreite (ΔS) größer wird. Bei den unbelasteten Proben ließ sich eine Schwankungsbreite von (ΔS) = $22,23 \text{ kp/cm}^2$ errechnen. Die vorbelasteten Serien wiesen höhere Schwankungsbreiten auf. Die Versuchsserie, die $1 \frac{3}{4}$ Std. vorbelastet wurde, ergab eine Schwankungsbreite von (ΔS) = $29,33 \text{ kp/cm}^2$. Diejenigen Prüfkörper, die $2 \frac{1}{2}$ Std. der Vorbelastung unterzogen wurden, wiesen eine Schwankungsbreite von (ΔS) = $33,8 \text{ kp/cm}^2$ auf, und die $3 \frac{1}{2}$ Std. lang vorbelasteten Proben hatten eine Schwankungsbreite von (ΔS) = $42,04 \text{ kp/cm}^2$ aufzuweisen.

Bei längerdauernden Vorbelastungen nähert man sich bereits dem Bereich des Brucheintritts der mittleren Festigkeitsgrenze, die anhand der Zeitstandfestigkeitslinie ermittelt wurde. Dies hat zur Folge, daß ein sprunghaftes Ansteigen der Schwankungsbreite zu verzeichnen ist. So ist bei den Proben, die $5 \frac{1}{4}$ Std. lang vorbelastet wurden, eine Schwankungsbreite von (ΔS) = $85,74 \text{ kp/cm}^2$ zu registrieren.

Die Größe der Schwankungsbreite sagt nichts aus über das Festigkeitsverhalten des Kunststoffes, jedoch ist mit steigender Schwankungsbreite ein An-

steigen des Inhomogenitätsgrades des Werkstoffes verbunden.

3. Dehnung der Prüfkörper:

Als Nebenergebnis wurde die Dehnung der Prüfkörper berücksichtigt.

Das Ausmaß der Dehnung läßt Schlüsse auf das Elastizitätsverhalten des Kunststoffes zu. Materialien mit hohem E-Modul ändern bei Einwirkung einer Kraft ihre Form nur geringfügig. Infolge Nachlassens des Relaxationsvermögens des Kunststoffes kommt es zu einer Störung des Molekulargefüges und zu einem Absinken des E-Moduls.

Dies kann soweit führen, daß nun ein Material mit völlig verändertem Festigkeitsverhalten vorliegt.

Die Länge der Proben wurde nach deren Vorbelastung gemessen. Dabei konnte eine Längenzunahme von etwa 2 mm (ca. 4 %) festgestellt werden.

Bei Heißpolymerisaten ist auch nach längerdauernden Belastungen nur eine geringfügige Dehnung nachweisbar, da diese gegenüber den Kaltpolymerisaten ein höheres Molekulargewicht sowie größere Kettenlängen als auch einen höheren Grad der Vernetzung besitzen.

Wie auch TRINKAUS bestätigt, nimmt die Dehnung der Prüfkörper mit fortschreitender Belastungszeit zu. An länger vorbelasteten Proben waren in der Mitte des Steges weißliche Verfärbungen sowie kleine Risse, oft am Übergang des Steges zu den Köpfen, sichtbar (Abb. 16).

4. Quasi-Kristallite:

Die Untersuchung der vorbelasteten Prüfkörper mit Hilfe der Differential-Thermo-Analyse (PERKIN-ELMER) sowie der Röntgen-Strukturanalyse ergab keinen Hinweis auf kristalline Strukturen.

In der Vorbehandlung und der dadurch bedingten geringen Orientierung der Makromoleküle sollte eine Ausbildung von Kristalliten nicht zu erwarten sein.

Die in den vorhergehend beschriebenen Festigkeitsprüfungen erhaltenen höheren Festigkeitswerte sind somit nicht auf einer Umordnung des Gefüges im positiven Sinne zurückzuführen, sondern sind höchstwahrscheinlich als ein Ergebnis der Methodik selbst aufzufassen, da ja offensichtlich die Strukturen unter der Vorlast im negativen Sinne (eingeleiteter Verfall) beeinflußt wurden (Abb. 16).

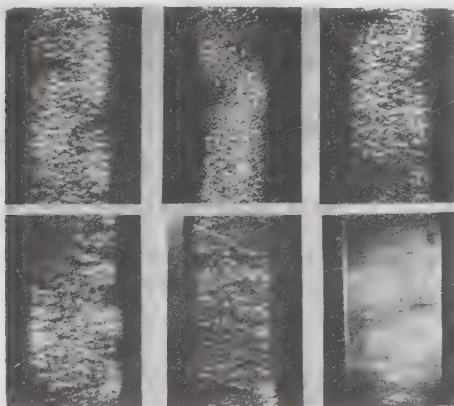


Abb. 16:

C. Z U S A M M E N F A S S U N G

In vorliegender Arbeit wurde die Maximalfestigkeit warmpolymerisierter Prüfkörper aus dem Dental-Kunststoff "Paladon 65" in Abhängigkeit von längerdauernden Vorbelastungen in mundähnlichem Milieu untersucht.

Insbesondere sollte geklärt werden, ob homogene oder inhomogene Prüfkörper höhere Kurzzeitfestigkeitswerte aufweisen. Die Fragestellung resultiert aus Untersuchungen JANKes, der feststellte, daß inhomogene Kunststoffproben u.U. eine höhere Kurzzeitfestigkeit erreichen können als homogene.

Eingangs wurde auf die Notwendigkeit von Kunststoffprüfungen hingewiesen sowie ein geschichtlicher Überblick über den Kunststoff in der prothetischen Zahnheilkunde gegeben. Außerdem wurde die Problematik der Kunststoffverarbeitung gestreift.

Zur Charakterisierung des Kunststoffes "Paladon 65" wurde die Zeitstandfestigkeitslinie aufgestellt, mit deren Hilfe die Größe der Vorlast für die folgenden Versuchsreihen ermittelt wurde. Die Untersuchungen wurden im mundähnlichen Milieu (RINGER-Lösung bei 37°C) durchgeführt.

Anhand der aus der Zeitstandfestigkeitslinie ermittelten Vorlast wurden Versuchsserien (je Serie 30 - 40 Proben) in verschiedenen Zeitintervallen vorbelastet (1 3/4 Std.; 2 1/2 Std.; 3 1/2 Std.; 5 1/4 Std.). Zur Kontrolle diente eine Serie unbelasteter Proben.

Mit der Universal-Prüfmaschine nach ROELL + KORTHAUS wurden die Kurzzeitprüfungen durchgeführt. Dabei kam ich zu folgenden Ergebnissen:

Die Prüfkörper, die 1 3/4 Std. lang einer Vorbe-

lastung von 22 kp ausgesetzt wurden, zeigten eine höhere Maximalfestigkeit (ca. 396 kp/cm^2) als die unbelasteten (ca. 386 kp/cm^2).

Mit zunehmender Belastungszeit wurden ungünstigere Maximalfestigkeitswerte registriert. Die 2 1/2 Std. lang vorbelasteten Prüfkörper liegen mit ca. 356 kp/cm^2 unter dem Niveau der unbelasteten Proben. Die Proben, die 3 1/2 Std. lang vorbelastet wurden, zeigen um 40 kp/cm^2 geringere Maximalfestigkeitswerte als die unbelasteten. Noch schlechtere Kurzzeitfestigkeitswerte weisen die 5 1/4 Std. lang vorbelasteten Prüflinge auf. Hier liegen die Werte bei ca. 340 kp/cm^2 .

Der Maximalfestigkeitswert von 396 kp/cm^2 wurde nicht weiter eingegrenzt, so daß es durchaus möglich ist, daß es ein noch höheres Festigkeitsmaximum geben kann, und daß dieses Maximum für den Kunststoff "Paladon 65" vor oder nach der Belastungszeit von 1 3/4 Std. liegen kann.

Es darf aber nicht vergessen werden, daß dieses Maximum kein absolutes ist, sondern nur in Verbindung mit der hier speziell angewandten Maximalfestigkeitsprüfung zu sehen ist, da eine Änderung der Vorschubgeschwindigkeit bei der Zugprüfung sicher eine Verschiebung des Maximums bedingt.

Bei dem Vergleich der Schwankungsbreite der einzelnen Serien läßt sich folgende Aussage machen:

Die geringste Schwankungsbreite haben die unbelasteten Proben ($22,23 \text{ kp/cm}^2$). Mit zunehmender Belastungszeit wird auch die Schwankungsbreite größer (1 3/4 Std.: $(\Delta S) = 29,33 \text{ kp/cm}^2$; 2 1/2 Std.: $(\Delta S) = 33,8 \text{ kp/cm}^2$; 3 1/2 Std.: $(\Delta S) = 42,04 \text{ kp/cm}^2$; 5 1/4 Std.: $(\Delta S) = 85,74 \text{ kp/cm}^2$).

Das Ansteigen der Schwankungsbreite (ΔS) bei gleichzeitig zunehmender Vorbelastung läßt auf eine sich

steigernde Umordnung im Molekulargefüge des Kunststoffes schließen.

Untersuchungen der vorbelasteten Proben mittels der Differential-Thermo-Analyse (PERKIN-ELMER) und der Röntgen-Strukturanalyse auf kristalline Strukturen (sog. Quasi-Kristallite) erwiesen sich als negativ. Die zuvor beschriebenen bei den Festigkeitsprüfungen erhaltenen höheren Festigkeitswerte sind somit nicht auf eine Umordnung des Gefüges im positiven Sinne zurückzuführen, sondern höchstwahrscheinlich als ein Ergebnis der Methodik selbst aufzufassen, da ja offensichtlich die Struktur unter der Vorlast im negativen Sinne (eingeleiteter Verfall) beeinflusst wurde.

D. L I T E R A T U R A N G A B E N

- APPENZELLER, M.: Materialprüfungen an neuen Zahnprothesenkunststoffen.
Schweiz. Mschr. f. Zahnheilk. 1946 Nr.6
- ARNOLD, D.: Die Bedeutung besonderer Verarbeitungs- und Polymerisationsverfahren für die Materialeigenschaften und Formgenauigkeit von zahnärztlichen Kunststoffen.
Diss. Erlangen 1955
- BAUER, W.: 1. Die Methakrylära in der Zahnheilkunde.
DZZ 4. Jg., H. 18
2. Aufbau und Eigenschaften von Dentalkunststoffen.
Kunststoffe 10/1948
- CORNELIUS, G.: Untersuchungen über den Einfluß der einseitigen Politur auf Form und Beständigkeit des Paladons unter Berücksichtigung der Wasseraufnahme.
Med. Diss. Marburg 1952
- DEHLINGER, U.: Handbuch der Werkstoffprüfung von E. Siebl.
Springer-Verlag, Berlin 1939
- DEWEIN, H.: Einführung in die zahnärztlichen Kunststoffprobleme.
DZZ 13/1345/1958
- DIN 53 455 Deutscher Normenausschuß
53 504 Prüfung und Herstellung von Kunststoffen
53 542
53 451

- DOLDER, 1. Neue Werkstoffprüfungen an Prothesenkunststoffen.
Schweiz. Mschr. f. Zahnheilk.
55/7/1945 S. 562 - 68
2. Neue Untersuchungen an Kunststoffen.
Schweiz. Mschr. f. Zahnheilk.
56/748/1946
- DUEGGELIN, J.: Physikalische Eigenschaften von Dental-Polymerisaten.
Med. Diss. Univ. Zürich 1967
- EICHNER, K.: Untersuchungen über veränderte Prothesenbasis-Kunststoffen und sogenannte werkstoffverbessernde Arbeitsweisen.
ZW 66/358/1965
- FILLINGER, K.H.: Dauerbiegefestigkeitsprüfungen des dentalen Kunststoffes "Paladon" in Abhängigkeit verschiedener Verarbeitungen.
Med. Diss. Marburg 1958
- FRANK, K.: Prüfungsbuch für Kautschuk, Gummi und Kunststoffe
2. Auflage Stuttgart 1968
Berlin Union Verlag
- GERNAND, G.: Kritische Betrachtung über die bisherigen Polymerisationsverfahren und Vorschläge zu ihrer Verbesserung.
Med. Diss. Marburg 1950
- HAEFELI, M.: Aufbau und Eigenschaften von Dental-kunststoffen.
Schweiz. Mschr. f. Zahnheilk.
57/779-905/1947

- HENKEL, G.: Ausgewählte Kapitel aus der Technologie zahnärztlicher Kunststoffe. Stoma, Jg. 48, H.1
- HENKEL-HROMATKA.: Die totale Prothese. Taschenbücher f. d. zahnärztl. Praxis Bd. 2, München 1962
- HERRMANN, W.: Prüfung der Dauerbiegefestigkeit von Prothesenkunststoffen. ZM Nr. 17/825-826/1967
- HOLZHAUSEN, B.: Homogenitätsstörungen des Paladons und Wege zu ihrer Vermeidung. Med. Diss. FU Berlin 1955
- JANKE, G.: 1. Über die Festigkeit zahnärztlicher Kunststoffe in Abhängigkeit von der Verarbeitung.
Habil. Schrift Marburg 1956
2. Die Abhängigkeit der Protheseneigenschaften von der Laborverarbeitung.
DZZ H. 21/1437/1955
3. Über die Abbauvorgänge an zahnärztlichen Kunststoffen.
DZZ 22.5./684-695/1967
4. Probleme der Kunststofftechnik.
DZZ 4/1159/1953
5. Das Gewichts-, Volumen- und Dichteverhalten unvernetzter Kunststoffe bei Austrocknung und Wasseraufnahme in Abhängigkeit von der Verarbeitung.
DZZ 12, H. 21, 1957

- KÖRBER, E.: Oberflächenbearbeitung zahnärztlicher Kunststoffe.
DZZ 562/1960
- KÜHL, W. und KNOLL, E.: Vergleichende Untersuchungen an neuen Prothesenkunststoffen.
Dtsch. Zahnärztebl. 20, H.4. 109, 1966
- MARX, H.:
1. Zur Polymerisationsproblematik dentaler Methakrylate.
ZW 61/747/1960
2. Werkstoffliche Gesichtspunkte zum abnehmbaren Zahnersatz.
Praxis der Zahnheilk. Bd. III, C 14
Urban + Schwarzenberg, München/
Berlin/Wien 1969
3. Über den Einfluß unterschiedlicher technologischer Bedingungen bei der Herstellung von Kunststoff-Prothesen.
Dent. - Labor 11/43/1963
- MARXKORS, R.: Werkstoffe in der zahnärztlichen Praxis.
S. 95-114 u. 165-169/1972
- MATTHES, H.: Drahtgittereinlagen in Paladon
Diss. Marburg 1951
- MENNINGER, H.H.: Belastungsversuche an neuen zahnärztlichen Basiskunststoffen.
Med. Diss. Tübingen 1962
- MEYER, H.: Über Verfärbungen an der Oberfläche von Prothesenkunststoffen infolge fehlerhafter Bearbeitung - mit besonderer Berücksichtigung der sogenannten Spannungsrisse.
DZZ 15, H. 6, 1960

- v. MEYSENBURG, C.M.: 1. Kunststoffe für Ingenieure
Hanser-Verlag München 1965
2. Das Zeitstandverhalten von Werkstoffen und seine Beeinflussung durch Korrosion.
Werkstoff und Korrosion
Verlag Chemie Weinheim / Bergstr.
18. Jg. Febr. 1967, H. 2, S. 106-112
- MORITZ, K.: Heißluftpolymerisation von Prothesenkunststoffen im mundähnlichen Milieu unter Berücksichtigung des HEDENT-Verfahren.
Med. Diss. Marburg 1971
- MÜLLER, F.H.: 1. Die Eigenschaften von Kunststoffen in Abhängigkeit von ihrer Vorgeschichte.
Kunststoffe Bd. 51, H.9/488/1961
2. Bleibende physikalische Veränderungen hochpolymerer Kunststoffe und deren Prüfung.
Kunststoffe 41/41/1951
- REHBERG, H.J.: 1. Ergebnisse von Untersuchungen über die Kunststoffverarbeitung.
ZR H. 10, 1955
2. Polymerisation und Molekulargewicht.
DZZ 12, H.21/1467/1957
- RITZE, H.: 1. Vergleichende Untersuchungen verschiedener Kunststoffe.
DZZ 12/1470/1957
2. Quellung der Kunststoffe.
DZZ 20/11/1245/1965

- SCHROEDER, A.: Die Eignung der Methacrylate als Prothesenkunststoffe im Lichte neuer Untersuchungen.
Schweiz. Mschr. f. Zahnheilk.
62/1110/1952 63/961/1953
- SCHULZ, H.: Grundwissen für Zahntechniker IV
Die totale Prothese, 1972
- SCHWICKERATH, H.: 1. Die Dynamik des Zahnersatzes in Abhängigkeit von Konstruktion und Werkstoff.
Dtsch. Zahnärztl. Z. 25/8/815-20/1970
2. Die thermischen Gebrauchseigenschaften von Prothesenmaterialien
DZZ 24/1060-1/1969
3. Zur Frage der Werkstoffprüfung
ZW 68/520-4/25. Juli 1967
4. Festigkeitsprüfungen mit elektronisch gesteuerten Prüfmaschinen.
ZW 69/156-7/10. Mar. 1968
5. Die elastischen Eigenschaften der Methacrylate.
DZZ 6/478/1961
6. Über die Prüfung zahnärztlicher Prothesenwerkstoffe und eine geeignete Prüfmaschine.
DZZ 13/201/1958
- SCHWINDLING, R.: Erfahrungen mit Prothesenkunststoffen.
Dtsch. Zahnärztebl. 20/16/511/1966
- STIEBELING, G.: Über die Dauerbiegefestigkeit zahnärztlicher Kunststoffe in Abhängigkeit von ihrer Verarbeitung.
Diss. Marburg 1956/57

- STRACK, R.: Für und wider den Kunststoff
DZZ 2Jg. H. 4/5, 7/8, 11 / 1947
- STUART, H.A.: Die Physik der Hochpolymeren Bd. IV
Theorie und Molekulare Deutung Technologischer Eigenschaften von Hochpolymeren Werkstoffen.
Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1956
- SUDHOLT/GOSSING: Die technologischen Grundlagen der Zahnprothetik V -Einführung in die Chemie - 1969
- TRINKAUS, J.: Zeitstandverhalten von Prothesenkunststoffen im mundähnlichen Milieu unter Berücksichtigung des HEDENT-Verfahrens.
Med. Diss. Marburg 1971
- UHLIG, H.: 1. Über die Blasenbildung bei der Paladonpolymerisation.
DZZ 25/708/1951
2. Über die Dauerbiegefestigkeit metallnetzverstärkter Kunststoffe
DZZ 6/13/707/1951
- VOSS, R.: 1. Die Materialeigenschaften von Prothesenkunststoffen und ihre klinische Bedeutung
Dtsch. Zahnärztekalendar, München 82-95/1968
2. Der Einfluß der Elastizität, besonders der elastischen Nachwirkung der Prothesenwerkstoffe auf das Verhalten der Prothesen und des tragenden Gewebes.
DZZ 12/21/1957

- WEICKART, P.: Werkstoffe für Zahnärzte
Carl Hanser Verlag München 1966
- WESTPHAL, W.H.: Physik
Springer-Verlag Berlin/Göttingen/
Heidelberg 1963
- WILD, W.: Über Zusammensetzung, Verarbeitung
und Struktur der zur Herstellung
von Prothesen am meisten gebrauchten
Acrylate.
Schweiz. Mschr. f. Zahnheilk. 11/1947

Tabelle 1

Paladon 65 Langzeitpolymerisation im Wasserbad

Belastung in kp	Tatsächl. Maß des Prüfk. (mm)	Zeit bis z. Bruch (h)	Entspr. Belastung bez. auf Standard- maß des Prüfk. 2,5 x 4,0 mm umgerechnet in kp/cm ²
--------------------	-------------------------------------	--------------------------	--

40	2,5 x 4,0	0,00	400
39	2,5 x 4,0	0,01	390
38	2,5 x 4,0	0,015	380
37	2,5 x 4,0	0,02	370
36	2,5 x 4,0	0,03	360
35	2,5 x 4,0	0,06	350
34	2,5 x 3,8	0,02	351,5
33	2,5 x 4,0	0,07	330
32	2,5 x 3,8	0,07	336,8
31	2,5 x 4,0	0,14	310
30	2,5 x 4,0	0,27	300
29	2,5 x 4,0	7,96	290
29	2,5 x 4,0	0,28	290
28	2,5 x 4,0	0,38	280
27	2,5 x 4,0	0,15	270
27	2,5 x 4,0	0,74	270
27	2,5 x 4,0	0,68	270
26	2,5 x 4,0	0,48	260
26	2,5 x 4,0	0,45	260
26	2,5 x 4,0	2,43	260
25	2,5 x 4,0	3,07	250
25	2,5 x 4,0	2,65	250
24	2,5 x 4,0	15,54	240
24	2,5 x 4,0	11,85	240
24	2,5 x 3,9	3,64	256,4

zu Tabelle 1

23	2,5 x 4,0	4,73	230
23	2,5 x 4,0	8,43	230
22	2,5 x 4,0	22,19	220
22	2,5 x 4,0	26,51	220
22	2,5 x 3,8	6,88	231,6
21	2,5 x 4,0	24,53	210
21	2,5 x 3,9	356,43	215,25
21	2,5 x 4,0	12,90	210
20	2,5 x 4,0	23,30	200
20	2,5 x 3,9	31,54	200
19	2,5 x 4,0	837,45	190
19	2,5 x 4,0	121,45	190
18	2,5 x 4,0	859,89	180
18	2,5 x 4,0	149,88	180

Tabelle 2

Belastung in kp	Tatsächl. Maß des Prüfk. (mm)	Zeit bis z. Bruch (h)	Entspr. Belastung bez. auf Standardmaß des Prüfk. 2,5 x 4,0 umgerechnet in kp/cm ²
--------------------	-------------------------------------	--------------------------	---

24	2,5 x 4,0	34,80	240
24	2,5 x 3,9	1,27	247,1
24	2,5 x 4,0	13,54	240
24	2,5 x 4,0	3,24	240
24	2,5 x 4,0	7,52	240
24	2,5 x 4,0	0,88	240
24	2,5 x 4,0	1,03	240
24	2,5 x 4,0	5,54	240
24	2,5 x 4,0	3,37	240
24	2,5 x 4,0	0,83	240
24	2,5 x 4,0	0,81	240
24	2,5 x 4,0	0,72	240
24	2,5 x 4,0	3,18	240
24	2,5 x 4,0	1,33	240
24	2,5 x 4,0	1,73	240

Tabelle 3

Belastung in kp	Tatsächl. Maß des Prüfk. (mm)	Zeit bis z. Bruch (h)	Entspr. Belastung bez. auf Standard- maß des Prüfk. 2,5 x 4,0 umgerechnet in kp/cm ²
23	2,5 x 3,8	7,84	242,1
23	2,5 x 3,8	0,50	242,1
23	2,5 x 3,9	1,34	235,9
23	2,5 x 3,8	6,16	242,1
23	2,2 x 4,0	10,96	261,4
23	2,5 x 3,8	3,85	242,1
23	2,5 x 3,9	2,26	235,9
23	2,5 x 3,9	4,39	235,9
23	2,8 x 3,9	1,08	211
23	2,5 x 3,8	0,32	231,5
23	2,8 x 3,8	2,22	216,8
23	2,8 x 3,8	3,17	216,8
23	2,2 x 3,9	1,39	267,9
23	2,8 x 3,9	0,60	211

Tabelle 4

Belastung in kp	Tatsächl. Maß des Prüfk. (mm)	Zeit bis z. Bruch (h)	Entspr. Belastung bez. auf Standard- maß des Prüfk. 2,5 x 4,0 umgerechnet in kp/cm ²
22	2,5 x 3,8	2,54	231,6
22	2,5 x 3,8	17,67	231,6
22	2,8 x 3,8	6,56	207,5
22	2,5 x 3,8	6,29	231,6
22	2,6 x 3,8	5,78	222,7
22	2,8 x 3,8	13,75	207,5
22	2,5 x 3,8	2,59	231,6
22	2,8 x 3,8	16,50	207,5
22	2,6 x 3,8	5,47	222,7
22	2,6 x 3,9	13,39	217,6
22	2,5 x 3,9	2,43	225,6
22	2,5 x 3,8	9,87	231,6
22	2,6 x 3,9	0,82	217,6
22	2,6 x 3,8	16,80	222,7
22	2,5 x 3,7	2,75	237,5
22	2,8 x 3,7	11,70	207,5
22	2,6 x 3,8	24,80	222,7
22	2,5 x 3,8	13,21	231,6
22	2,7 x 3,8	2,39	217
22	2,5 x 3,8	3,88	231,6
22	2,8 x 3,8	5,91	207,5
22	2,5 x 3,8	1,21	231,6
22	2,6 x 3,9	37,42	217,6
22	2,5 x 3,9	19,03	225,6
22	2,5 x 3,8	9,96	231,6
22	2,5 x 3,8	3,14	231,6
22	2,5 x 4,0	14,77	220
22	2,5 x 4,0	6,38	220

zu Tabelle 4

22	2,5 x 4,0	10,98	220
22	2,5 x 4,0	1,40	220
22	2,6 x 4,0	7,77	211,5
22	2,8 x 4,0	8,95	196,4
22	2,7 x 4,0	0,50	203,7
22	2,7 x 4,0	7,77	203,7
22	2,6 x 3,9	18,01	216
22	2,5 x 4,0	6,44	220

Tabelle 5

Belastung in kp	Tatsächl. Maß des Prüfk. (mm)	Zeit bis z. Bruch (h)	Entspr. Belastung bez. auf Standard- maß des Prüfk. 2,5 x 4,0 umgerechnet in kp/cm ²
21	2,5 x 3,7	6,93	227
21	2,5 x 4,0	39,52	210
21	2,5 x 4,0	48,07	210
21	2,4 x 3,9	5,19	230
21	2,4 x 3,9	0,50	230
21	2,4 x 3,8	0,35	230,3
21	2,2 x 4,0	4,87	238,4
21	2,4 x 3,9	7,61	234
21	2,4 x 4,0	14,79	219,8
21	2,6 x 3,9	46,77	207,1
21	2,5 x 4,0	19,45	210
21	2,4 x 3,9	6,00	234
21	2,4 x 3,9	47,87	234
21	2,4 x 3,8	3,12	230

Tabelle 6

Die Kurzzeitfestigkeit von Paladonprüfkörpern ohne
Vorlast

Tatsächl. Maß des Prüfk. (mm)	Kurzzeitfestigkeit d. Prüfk. bez. auf Standardmaß 2,5 x 4,0 mm umge- rechnet in kp/cm^2	Schwankungsbreite (ΔS) bez. auf den arithmet. Mittelwert d. Summe der gesamten Belastungen (383,47 kp/cm^2)
-------------------------------------	--	--

2,5 x 4,0	356	-27,47
2,5 x 4,0	390	6,53
2,5 x 4,0	400	16,53
2,5 x 4,0	375	- 8,47
2,5 x 4,0	370	-13,47
2,5 x 4,0	365	-18,47
2,5 x 4,0	300	-83,47
2,5 x 4,0	410	26,53
2,5 x 4,0	384	0,53
2,5 x 4,0	388	4,53
2,5 x 4,0	415	31,53
2,5 x 4,0	390	6,53
2,5 x 4,0	250	-133,47
2,5 x 4,0	395	11,53
2,5 x 4,0	428	44,53
2,5 x 4,0	430	46,53
2,5 x 4,0	422	38,53
2,5 x 4,0	372	-11,47
2,5 x 4,0	366	-17,47
2,5 x 4,0	410	26,53
2,5 x 4,0	368	-15,47
2,5 x 4,0	359	-24,47
2,5 x 4,0	382	- 1,47
2,5 x 3,9	364,1	-19,37
2,5 x 3,9	381,5	- 1,97

zu Tabelle 6

2,5 x 3,9	380	- 3,47
2,5 x 3,9	400	16,13
2,5 x 3,9	404	20,53
2,5 x 3,9	385,6	2,13
2,5 x 3,9	383,5	0,03
2,5 x 3,8	402,1	18,63
2,6 x 3,9	404,3	20,83
2,6 x 3,9	433,8	50,33
2,6 x 3,9	412,2	28,73
2,6 x 3,9	385,6	2,13
2,4 x 4,0	364,6	-18,87
2,4 x 4,0	380	- 3,47

Tabelle 7

Die Kurzzeitfestigkeit von Paladonprüfkörpern nach
1 3/4 Std. Vorbelastung (Vorlast 22 kp)

Tatsächl. Maß d. Prüfk. (mm)	Kurzzeitfestigkeit d. Prüfk. bez. auf Stardmaß 2,5 x 4,0 mm ungerechnet in kp/cm^2	Schwankungsbreite (ΔS) bez. auf den arithmet. Mittelwert d. Summe der gesamten Belastungen (396,78 kp/cm^2)
------------------------------------	---	--

2,5 x 4,0	462	65,22
2,5 x 4,0	448	51,22
2,5 x 4,0	378	-18,78
2,5 x 4,0	444	47,22
2,5 x 4,0	400	3,22
2,5 x 4,0	385	-11,78
2,5 x 4,0	365	-31,78
2,5 x 4,0	370	-26,78
2,5 x 4,0	390	- 6,78
2,5 x 4,0	360	-36,78
2,5 x 4,0	406	9,22
2,5 x 4,0	440	43,22
2,5 x 4,0	440	43,22
2,5 x 4,0	365	-31,78
2,5 x 4,0	338	-58,78
2,5 x 4,0	380	-16,78
2,5 x 4,0	390	- 6,78
2,5 x 4,0	425	28,22
2,5 x 4,0	374	-22,78
2,5 x 4,0	350	-46,78
2,5 x 4,0	357	-39,78
2,5 x 4,0	428	31,22
2,5 x 4,0	526	129,22
2,5 x 4,0	408	11,22
2,5 x 4,0	378	-18,78
2,5 x 4,0	400	3,22

zu Tabelle 7

2,5 x 4,0	380	-16,78
2,5 x 4,0	406	9,22
2,5 x 3,9	383,6	-13,18
2,5 x 3,9	379,5	-17,28
2,5 x 3,9	389,7	- 7,08
2,5 x 3,9	420,5	23,72
2,5 x 3,9	377,5	-19,28
2,5 x 3,9	346,6	-50,18

Tabelle 8

Die Kurzzeitfestigkeit von Paladonprüfkörpern nach
2 1/2 Std. Vorbelastung (Vorlast 22 kp)

Tatsächl Maß	Kurzzeitfestigkeit	Schwankungsbreite
d. Prüfk.	d. Prüfk. bez. auf	(ΔS) bez. auf den
(mm)	Standardmaß	arithmet. Mittelwert
	2,5 x 4,0 mm	d. Summe der gesamten
	umgerechnet in	Belastung
	kp/cm ²	(356,96 kp/cm ²)

2,5 x 4,0	320	36,96
2,5 x 4,0	390	33,04
2,5 x 4,0	382	25,04
2,5 x 4,0	400	43,04
2,5 x 4,0	365	8,04
2,5 x 4,0	310	-46,96
2,5 x 4,0	360	3,04
2,5 x 4,0	370	13,04
2,5 x 4,0	210	-146,96
2,5 x 4,0	425	68,04
2,5 x 4,0	390	33,04
2,5 x 4,0	305	-51,96
2,5 x 4,0	315	-41,96
2,5 x 4,0	390	33,04
2,5 x 4,0	335	-21,96
2,5 x 4,0	380	23,04
2,5 x 4,0	310	-46,96
2,5 x 4,0	380	23,04
2,5 x 4,0	420	63,04
2,5 x 4,0	345	11,96
2,5 x 3,9	353,8	- 3,16
2,5 x 3,9	317,9	-39,06
2,5 x 3,9	358,9	1,94
2,5 x 3,9	389,7	32,74
2,5 x 3,9	394,8	37,84

zu Tabelle 8

$2,5 \times 3,9$	364,1	7,14
$2,5 \times 3,9$	348,7	- 8,26
$2,5 \times 3,9$	420,5	63,54
$2,4 \times 4,0$	296,8	-60,16
$2,4 \times 4,0$	348,9	- 8,06
$2,6 \times 3,9$	369,8	12,84

Tabelle 9

Die Kurzzeitfestigkeit von Paladonprüfkörpern nach
3 1/2 Std. Vorbelastung (Vorlast 22 kp)

Tatsächl. Maß d. Prüfk. (mm)	Kurzzeitfestigkeit d. Prüfk. bez. auf Standardmaß 2,5 x 4,0 mm umge- rechnet in kp/cm^2	Schwankungsbreite (ΔS) bez. auf den arithmet. Mittelwert d. Summe der gesamten Belastungen (344,4 kp/cm^2)
------------------------------------	--	---

2,5 x 4,0	380	35,6
2,5 x 4,0	310	-34,4
2,5 x 4,0	380	35,6
2,5 x 4,0	357	12,6
2,5 x 4,0	370	25,6
2,5 x 4,0	300	-44,4
2,5 x 4,0	420	75,6
2,5 x 4,0	362	17,6
2,5 x 4,0	374	29,6
2,5 x 4,0	300	-44,4
2,5 x 4,0	218	-126,4
2,5 x 4,0	360	15,6
2,5 x 4,0	268	-76,4
2,5 x 4,0	420	75,6
2,5 x 4,0	270	-74,4
2,5 x 4,0	390	45,6
2,5 x 4,0	264	-80,4
2,5 x 4,0	270	-74,4
2,5 x 4,0	310	-34,4
2,5 x 4,0	440	95,6
2,5 x 4,0	362	17,6
2,5 x 4,0	310	-34,4
2,5 x 4,0	345	0,6
2,5 x 4,0	338	- 6,4

zu Tabelle 9

2,5 x 4,0	359	- 5,4
2,5 x 4,0	388	43,6
2,5 x 4,0	325	-19,4
2,5 x 4,0	405	60,6
2,5 x 4,0	384	39,6
2,5 x 3,9	336,4	- 8,0
2,5 x 3,9	353	8,6
2,5 x 3,9	364,1	19,7
2,6 x 3,9	404,3	59,9
2,6 x 3,9	292,9	-51,5

Tabelle 10

Die Kurzzeitfestigkeit von Paladonprüfkörpern nach
5 1/4 Std. Vorbelastung (Vorlast 22 kp)

Tatsächl. Maß d. Prüfk. (mm)	Kurzzeitfestigkeit d. Prüfk. bez. auf Standardmaß 2,5 x 4,0 mm unge- rechnet in kp/cm^2	Schwankungsbreite (ΔS) bez. auf den arithmet. Mittelwert d. Summe der gesamten Belastungen ($\Delta S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta S_i$)
2,5 x 4,0	300	-42,74
2,5 x 4,0	346	3,26
2,5 x 4,0	310	-32,74
2,5 x 4,0	315	-27,74
2,5 x 4,0	200	-142,74
2,5 x 4,0	390	47,26
2,5 x 4,0	190	-152,74
2,5 x 4,0	388	45,26
2,5 x 4,0	348	5,26
2,5 x 4,0	267	-75,74
2,5 x 4,0	254	-88,74
2,5 x 4,0	305	-37,74
2,5 x 4,0	398	55,26
2,5 x 4,0	388	45,26
2,5 x 4,0	374	31,26
2,5 x 4,0	382	39,26
2,5 x 4,0	438	95,26
2,5 x 4,0	380	37,26
2,6 x 3,9	393,4	57,26
2,6 x 3,9	416,1	79,36
2,6 x 3,9	400	57,26
2,6 x 3,9	360	17,26
2,6 x 3,9	265,2	-77,54
2,6 x 4,0	336,5	-6,24

zu Tabelle 2.

2,6 x 4,0	232 3	134,40
2,6 x 4,0	235 3	13,36
2,6 x 4,0	303	36,36
2,6 x 4,0	333 3	13,36
2,5 x 3,9	333 3	13,36
2,5 x 3,9	333 3	72,36
2,5 x 3,9	333 3	77,76
2,5 x 3,9	333 3	13,36
2,5 x 3,9	333	13,36
2,5 x 3,9	333	13,36
2,8 x 3,9	333 3	22,36
2,7 x 4,0	233 3	13,36
2,2 x 4,0	333 3	36,36
2,4 x 3,9	333 3	36,36

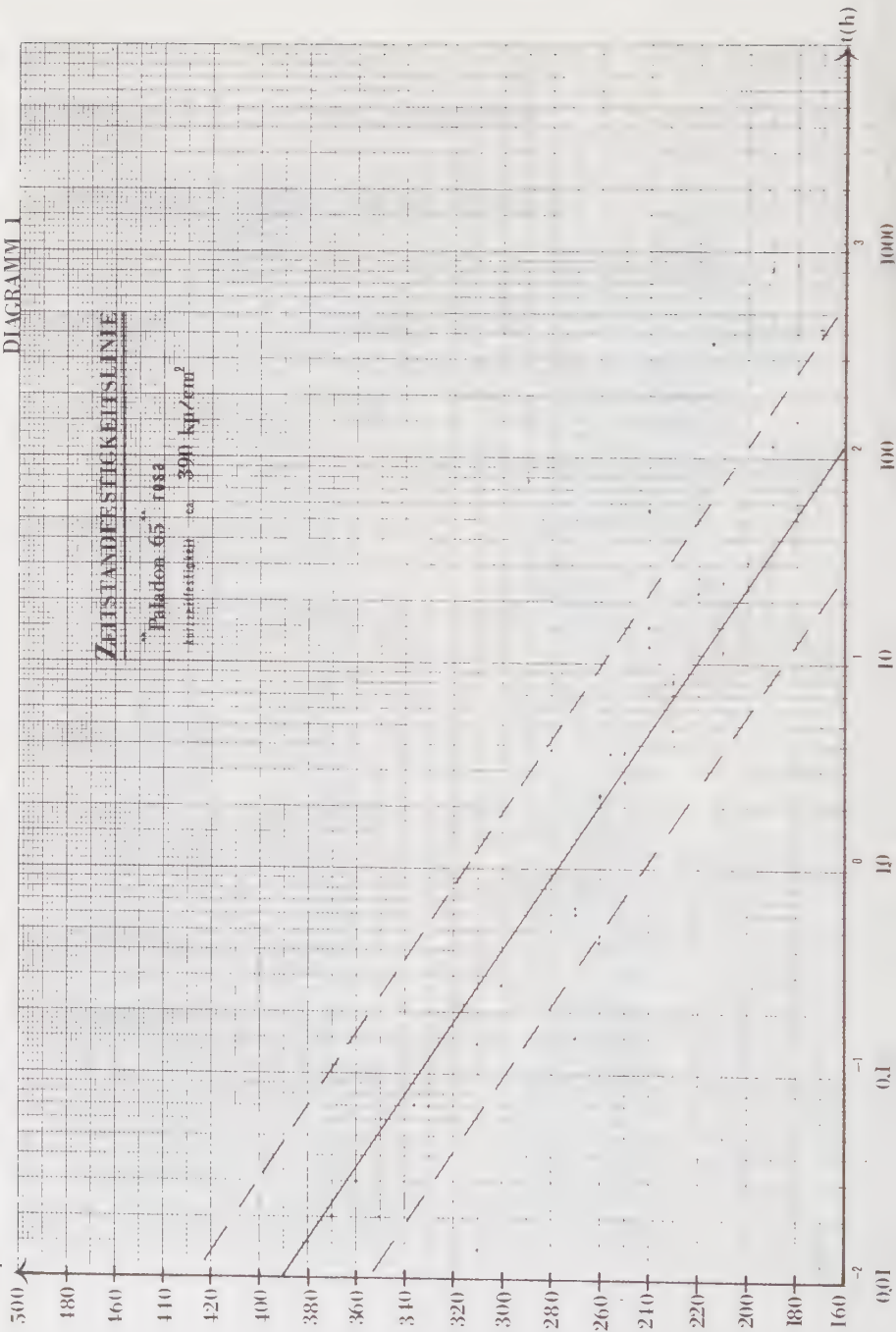
$P(kp)$

DIAGRAM 1

ZEISTANDFESTIGKEITSLINIE

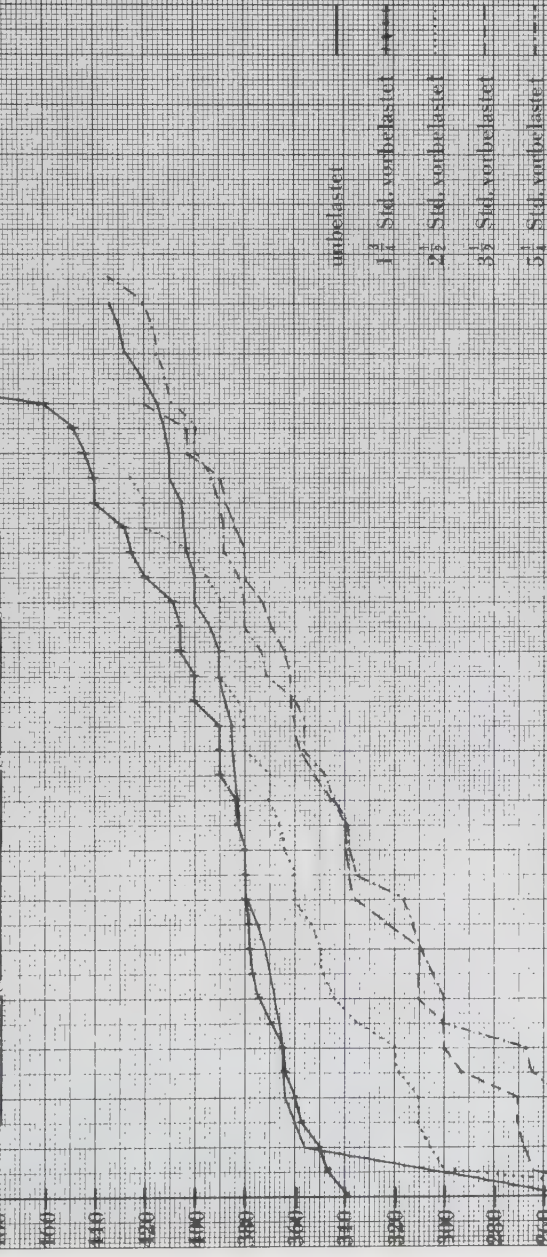
Paladon 65 1082

berzestigkeit ca. 390 kp/cm²



σ (Kp./cm²)

Kurzzeitfestigkeitswerte in aufsteigender Reihe geordnet



(n)

(Anzahl der Prüfkörper)

Die arithmetischen Mittelwerte der Maximalfestigkeit
der Prüfkörper

P (N/mm²)

der Prüfkörper

1) Stb. unbelastet
unbelastet

2) Stb. vorbelastet
3) Stb. vorbelastet
5) Stb. vorbelastet

35 (n)

Anzahl der Prüfkörper

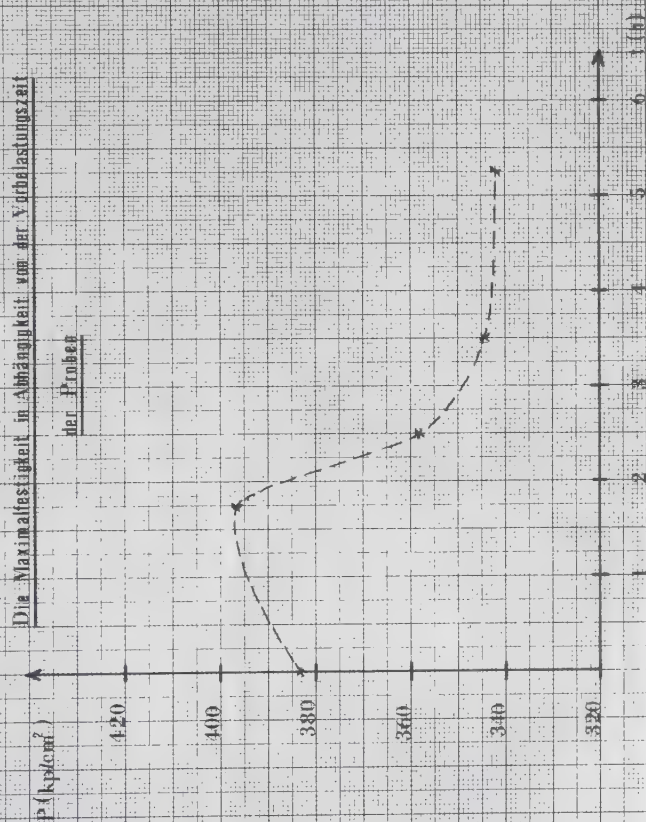


DIAGRAM 5

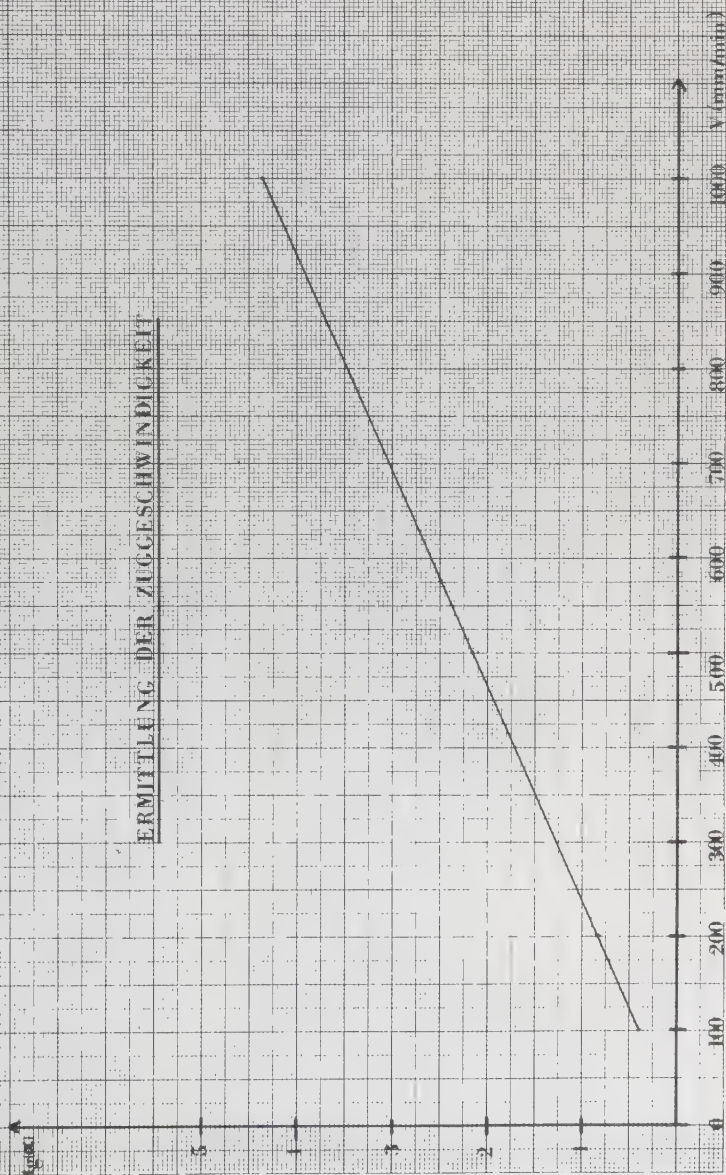
P (kp/cm²)

Abhängigkeit der Schwankungsbreite (ΔS) von der Vorbelastung (t)



DIAGRAMM 6

ERMITTLUNG DER ZUGGESCHWINDIGKEIT



Herrn Prof. Dr. G. Janke danke ich herzlichst für die Anregung zur Bearbeitung dieses Themas sowie für die Bereitstellung eines Arbeitsplatzes in seiner Abteilung.

Weiterhin gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.

F. H. Müller für die Überlassung eines Arbeitsplatzes in seinem Institut und Herrn Dr. Göritz für die jederzeit erhaltene Anregung und Unterstützung.

erner danke ich Herrn Scherer der Firma Leitz für die Anfertigung der polarisationsoptischen Aufnahmen sowie Frau Simon-Müller, die mir bei der Herstellung der Fotografien behilflich war.

Lebenslauf

Am 20. Januar 1944 wurde ich in Giessen als Sohn des kaufmännischen Angestellten Karl Pauly und seiner Ehefrau Mathilde geb. Herget geboren. Nach vierjährigem Volksschulbesuch trat ich im Frühjahr 1954 in die Herderschule (Gymnasium für Jungen) ein.

Ab 1962 besuchte ich die Wirtschaftsoberschule (Gymnasialer Zweig). Ostern 1965 erhielt ich dort das Zeugnis der Reife. Im April 1965 begann ich an der Medizinischen Fakultät der Philipps-Universität Marburg das Studium der Zahnheilkunde. Im Sommer 1966 bestand ich die naturwissenschaftliche Vorprüfung und im Frühjahr 1968 die zahnärztliche Vorprüfung. Nach absolvierter zahnärztlicher Prüfung am 9.12.1970 wurde mir am 21.12.1970 die Bestallung als Zahnarzt erteilt.

Von April 1971 bis September 1972 wurde ich als wehrpflichtiger Zahnarzt zur Ableistung des Grundwehrdienstes zur Bundeswehr eingezogen.

Seit Oktober 1972 bin ich als wissenschaftlicher Assistent am Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Justus Liebig-Universität in Giessen angestellt.

Seit August 1973 bin ich mit den Arbeiten zu der vorliegenden Dissertation beschäftigt.

Meine akademischen Lehrer waren die Damen und Herren
Professoren und Dozenten

Bommer, Dimroth, Gedigk, Haan, Havemann, Hennis,
Herfarth, Hennig, Heuser, Hohorst, Hort, Janke,
Kamke, Karlson, Koransky, Korb, Mahr, Mann, Mannheim,
Niemeyer, Pantke, Petry, Pfütz, Rodeck, Rohen,
Rosemann, Salfeld, Schiff, Schmidt, Schnell, Seidel,
Siegert, Strohmeyer, Vogt, Voss, Walcher, Witzel,
Zilliken.

